Programme TUNREN – v 1.00



D. Notice technique:

Calcul d'extrusion au front de taille

1. TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente le module EXTRUSION permettant l'analyse des déplacements d'extrusion au front de taille d'un tunnel et de sa stabilité :

- dans son état naturel
- avec prise en compte d'un renforcement du front par boulonnage
- avec une stabilisation du front par une pression de confinement (utilisation des boucliers)

Il détaille le principe de calcul, qui est basé sur le modèle analytique EXTRUSION, développé par H. Wong et Al (1999 a) (licence CNRS – ENTPE). Le manuel d'utilisation présente ensuite les manipulations courantes de TunRen, ainsi que quelques exemples représentatifs.

3 LE MODELE EXTRUSION

La méthode de calcul adoptée est celle développée par H.WONG et al du CNRS - ENTPE de Lyon [4]. Ce modèle permet l'analyse du front d'un tunnel en contraintes - déformations avec la possibilité de tenir compte d'un renforcement par boulons (calcul à court terme).
Comme pour le modèle Convergence - Confinement, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour développer les formulations. Ces hypothèses sont détaillées ci-après.

3.1 Les hypothèses du modèle

3.1.1 Hypothèses générales de base (identiques à celles de la méthode convergence - confinement) :

- Tunnel en section circulaire, correspondant à l'hypothèse de symétrie sphérique
- Milieu infini, homogène et isotrope
- Champs de contraintes initiales uniforme, c'est - à - dire tel que l'on peut négliger le gradient de contraintes sur la hauteur du tunnel (tunnel relativement profond)

3.1.2 Autres hypothèses spécifiques

- *Symétrie sphérique du champs de contraintes – déformations :* pour réduire le problème tridimensionnel de départ à un problème unidimensionnel, on assimile le front, souvent légèrement concave, à une surface sphérique, et on admet que les grandeurs mécaniques – (contraintes, déplacements, déformations) - devant le front respectent la symétrie sphérique (Figure 1).

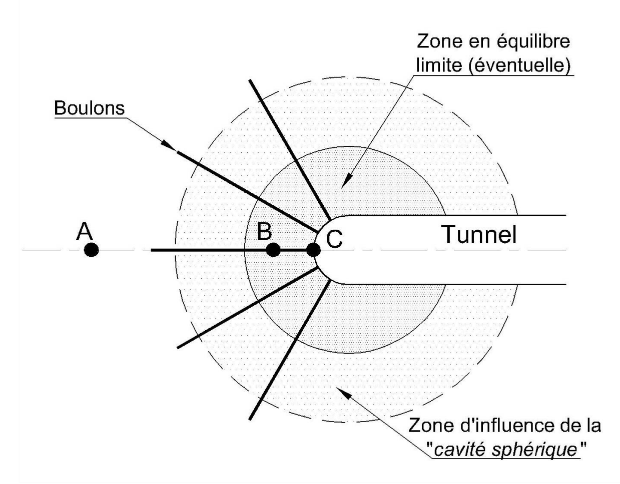


Figure 1: Modèle Extrusion

- *Principe de déconfinement :* ce principe a pour objet de modéliser l'avancement du tunnel par la simulation d'une pression radiale σ_R à l'intérieur de la cavité sphérique, qui diminue de la contrainte initiale σ_0 jusqu'à une valeur nulle.

$$\sigma_R = \sigma_0.(1-\lambda)$$

et de calculer les déplacements radiaux u_R des parois de la cavité sphérique.

Le tableau 1 montre que, sur les parois de la cavité sphérique :

- Pour $\lambda = 0$, $\sigma_R = \sigma_0$, $u_R = 0$: c'est l'état représentatif du point A, non influencé par le creusement (en pratique à plus de deux diamètres environ)
- Pour $0 < \lambda < 1$, $0 < \sigma_R < \sigma_0$, $u_R > 0$: c'est un état représentatif du point B, qui est déjà influencé par le creusement.
- Pour $\lambda = 1$, $\sigma_R = 0$, u_R est maximal : c'est le cas représentatif du point C situé sur le front; le déplacement u_R est maximal : c'est la valeur de l'extrusion du front notée u_f (en l'absence de pression de confinement au front).

$\lambda = 0$	$0 < \lambda < 1$	$\lambda = 1$
Point A	Point B	Point C
$\sigma_R = \sigma_0$	$0 < \sigma_R < \sigma_0$	$\sigma_R = 0$
$u_R = 0$	$u_R > 0$	u_R maximal = u_f

Tableau 1 : Principe de déconfinement

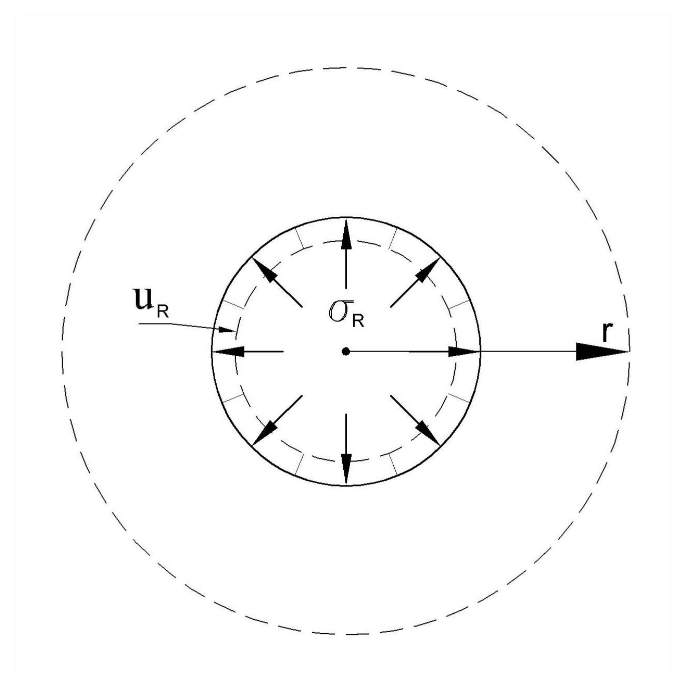


Figure 2: Principe de déconfinement

Nota 1 : dans le cas particulier d'une pression de confinement au front p_f, le calcul est mené jusqu'à une valeur $\lambda = (\sigma_0 - p_f)/\sigma_0 < 1$.

Nota 2 : on calcule une valeur unique de l'extrusion, c'est-à-dire le déplacement radial des parois de la cavité sphérique, alors que dans la réalité, avec un front plan, l'extrusion est maximale au centre et minimale aux bords du tunnel (Figure 3), comme le montre par exemple un modèle par éléments finis (EF) axisymétrique. La modélisation simplifiée du modèle Extrusion cherche à évaluer la valeur moyenne de l'extrusion donnant la perte de volume du front.

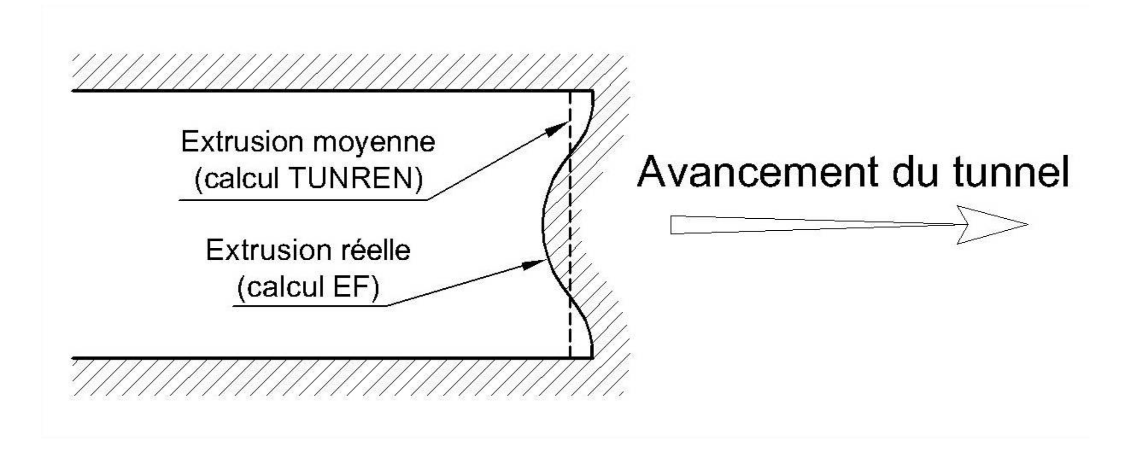


Figure 3 : Extrusion au front.

- *Prise en compte du boulonnage :* ls boulons sont supposés de longueur infinie, présents dans le sol dès l'instant initial, et disposés dans la direction radiale (Figure 1). L'approche d'homogénéisation, selon les principes décrits par Greuell (1993) [2] pour le boulonnage radial et adaptée par Jassionnesse et al (1998) [1] pour le boulonnage axial, permet de remplacer le matériau composite constitué du sol et des boulons par un milieu homogène équivalent mais anisotrope du fait de l'action directionnelle du renforcement. On suppose que le tenseur des contraintes macroscopiques peut être décomposé en deux parties, une première due au sol et une deuxième due aux boulons :

$$\overline{\overline{\sigma}} = \overline{\overline{\sigma_s}} + \overline{\overline{\sigma_b}}$$

Le matériau composite massif - boulons est considéré avec un comportement élastoplastique écrouissable. Seule la contribution due à la traction dans les boulons est prise en compte, en négligeant celles dues à l'effort tranchant et au moment fléchissant.

Les boulons sont supposés parfaitement scellés au terrain (adhérence parfaite) : il n'y a pas de déplacement relatif terrain - boulons. La prise en compte d'une limite d'adhérence avec la possibilité d'un glissement boulon - terrain a été abordée en théorie [2] mais la modélisation n'est pas encore programmée dans la version actuelle de TunRen. L'hypothèse d'adhérence parfaite conduit à une surestimation de la traction dans les boulons et une sous-estimation de l'extrusion du front de taille.

3.2 Le développement des zones élastoplastiques suivant l'avancement du tunnel

Partant d'une phase élastique parfaite (terrain et renforcements), pour un point très loin du front, on peut obtenir à l'approche du front un développement de phases plastiques dans le sol ou dans les boulons. On peut alors avoir deux scénarii différents :

- CAS A : Le sol plastifie avant les boulons
- CAS B : Les boulons plastifient avant le sol

Ce dernier scénario B est peu réaliste et l'apport des boulons au-delà de leur plastification n'est pas très intéressant. Ce cas n'est pas développé dans TunRen.
Sur la figure 4, on résume l'évolution des zones élastiques et plastiques pour le scénario CAS A.

Développement du scénario CAS A:

Lorsque λ croît de 0 à 1, on peut avoir 3 phases successives :

- Phase A1 : le milieu reste entièrement élastique EL (terrain et boulons)
- Phase A2 : il se développe une zone plastifiée dans le terrain, jusqu'à une distance w "rayon de plastification du terrain". Au-delà, le milieu reste élastique EL.
- Phase A3 : en plus de la zone plastique dans le terrain PL_s, il se développe une zone plastique dans les boulons PL_b, jusqu'à une distance z "rayon de plastification des boulons", avec z< w. Au-delà de w, le milieu reste élastique EL.

EL Milieu entièrement élastique
PL_s Zone plastifiée du terrain
PL_b Zone plastifiée des boulons

Phase A1 Milieu entièrement élastique	EL r R
Phase A2 Plastification du sol : rayon de plastification w	PL_s EL r R w
Phase A3 Plastification des boulons : rayon de plastification : z	PL_s/PL_b PL_s EL r R z w

Figure 4 : Développement des zones élastoplastiques

Les formulations correspondant à chaque phase sont présentées en annexe A pour le modèle de TRESCA et en annexe B pour le modèle de MOHR-COULOMB.
Pour le comportement de MOHR-COULOMB (φ < 1°), la phase A3 de plastification des boulons n'est pas encore implémentée dans TunRen.

3.2 Lois de comportement

Dans le modèle "Extrusion", le terrain, ainsi que les boulons, sont modélisés avec un comportement élastoplastique.

3.2.1 Loi de comportement élastique :

En élasticité, on peut sommer les contraintes du terrain et du sol (E. GREUELL 1993) [2]:

$$\overline{\overline{\sigma}} = \overline{\overline{\sigma_s}} + \overline{\overline{\sigma_b}}$$

La contrainte dans le sol est définie par la formule classique suivante :

$\overline{\overline{\sigma_s}} = 2\mu_s\overline{\overline{\varepsilon}} - \lambda_s tr(\overline{\overline{\varepsilon}})\overline{\overline{1}}$ avec λ_s et μ_s coefficients de Lamé du sol

Pour les boulons, on suppose que :

- leur apport en terme de contraintes est limité à la direction radiale.

- la contrainte peut être obtenue en moyennant sur la surface tributaire de chaque boulon

Du fait de l'adhérence parfaite avec le terrain et de la disposition particulière des boulons, le tenseur des contraintes dû aux boulons s'écrit :

$\overline{\overline{\sigma_b}} = K(r)\varepsilon_{rr}\overline{e_r} \otimes \overline{e_r}$ avec $K(r) = n..A.E_b.\left(\frac{R}{r}\right)^2$ pour TRESCA

et $K(r) = \frac{k^2}{r^2}E_S$ pour MOHR - COULOMB

3.2.2 Critère de plasticité

Pour le sol renforcé on écrit:

TRESCA	MOHR – COULOMB
$f(\overline{\overline{\sigma}}) = \lvert\sigma_r - \sigma_\vartheta\rvert - 2c - \sigma_0(r) \le 0$	$f(\overline{\overline{\sigma}}) = K_p(\sigma r - \sigma_0(r)) - \sigma_\vartheta(r) - 2c\sqrt{K_p} \le 0$
où $\sigma_0(r) = n.A.E_b\left(\frac{R}{r}\right)^2 \varepsilon_r$	où $\sigma_0(r) = \frac{k^2}{r^2}E_S\varepsilon_r$ avec $k = \sqrt{n.A\frac{E_b}{E_S}} * R$

$\sigma_0(r)$ est la part de la contrainte radiale reprise par le boulonnage. Ici on suppose que les boulons n'entrent pas en plasticité en même temps que le sol, mais plus tard, quand $\varepsilon_r = \varepsilon_{yb}$ avec $\varepsilon_{yb} = \sigma_{yb} / E_b$ (seuil de déformation radial marquant le début de la plasticification du boulon).

A partir du moment où $\varepsilon_r > \varepsilon_{yb}$, on écrit :

$\sigma_0(r) = n.A.\sigma_{yb}\left(\frac{R}{r}\right)^2$	$\sigma_0(r) = \frac{k^2}{r^2}\sigma_{yb}$

On a donc une sorte de critère d'écrouissage pour lequel $\sigma_0(r)$ dépend de ε_r .

3.2.3. Loi d'écoulement

Une fois que le critère de plasticité du terrain est atteint, le calcul des déformations plastiques se fait à partir de deux règles d'écoulement différentes:

- Critère de TRESCA [4]
- Critère de MOHR-COULOMB

Vous trouverez en annexe A et B les formulations détaillées pour les contraintes et les déformations ainsi que pour les rayons plastiques dans les différents phases 1 2 et 3 pour le modèle de TRESCA [4] (A) et MOHR-COULOMB (B).

3.4 REFERENCES

[1] Jassionnesse C. 1998, Contrôle de la déformation du massif renforé par boulonnage au front de taille d'un tunnel - Thèse INSA Lyon, 1998.

[2] Greuelle E. 1993, Etude du soutènement des tunnels par boulons passifs dans les sols et les roches tendres par une méthode d'homogénéisation - Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique 1993.

[3] Guilloux A., 2003, Stabilité et renforcement des fronts de taille des tunnels: une approche en contraintes – déformations, à paraître Revue Française de Géotechnique

[4] Wong H., Subrin D., Jassionnesse C. ,1998, Comportement du front de taille d'un tunnel renforcé par des inclusions en fibre de verre, modèle analytique, Geomatériaux, Environnement, Ouvrage (GEO), Ed.Hermes Paris, pp.133-147.

[5] Wong H., Trompille V., Dias D. 1999, Déplacements du front d'un tunnel renforcé par boulonnage prenant en compte le glissement boulon – terrain : approches analytique, numérique et données in situ. Revue Française de Géotechnique N°89, pp.13-28.

[6]Wong H., Trompille V., Subrin D., Guilloux A. , 1999, Tunnel face reinforced by longitudinal bolts: Analytical model and in situ data. Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Compte rendu pp.435-440, Tokyo, Japon.

[7] Wong H., Subrin D., Dias D., 2000, Extrusion movements of a tunnel head reinforced by finite length bolts – a closed form solution using homogenisation approach. Int. J. Num. Analy. Meth. Geomech, Vol.24, No.4, pp.533-565.

4 MANUEL D'UTILISATION

On présente dans ce chapitre les paramètres nécessaires à l'exécution du calcul Extrusion ainsi que les valeurs limites dans TunRen pour les différents paramètres.

4.1 Données

4.1.1 Terrain

Les données du terrain sont à saisir dans les onglets "Données générales" et "Terrain" de la fenêtre "Données et calculs" (Figure 5).

Données	Limites
E_0 : Module d'Young à court terme	1 MPa < E_0 < 100000 MPa
c_0 : Cohésion à court terme	0.001 MPa < c_0 < 10 MPa (Note 2)
σ_0 : Contrainte initiale	$\sigma_o > 0$
φ_0 : Angle de frottement a court terme	$0 < \varphi_0 < 70°$
ψ_0 : Angle de dilatance à court terme	$0 < \psi_0 < 20°$

Tableau 2 : Données relatives au terrain et leurs limites.

Nota 1 : S'agissant d'un comportement instantané, seules les données à court terme sont à considérer.

Nota 2 : La valeur minimale de la cohésion également limitée aussi, à cause de problèmes de convergence numérique, par rapport à la contrainte initiale du terrain σ_0 :

- Tresca : $c_0 \geq \sigma_0/20$
- Mohr-Coulomb : $c_0 \geq \sigma_0/100$

Le coefficient de Poisson ν est pris automatiquement égal à 0,5 pour simplification (problème de solution des équations). Son influence sur les résultats n'est pas très importante.

Le choix du modèle de comportement du terrain est fait de façon automatique à partir de l'angle de frottement.

- $\varphi < 1°$: Tresca
- $\varphi \geq 1°$: Mohr-Coulomb.

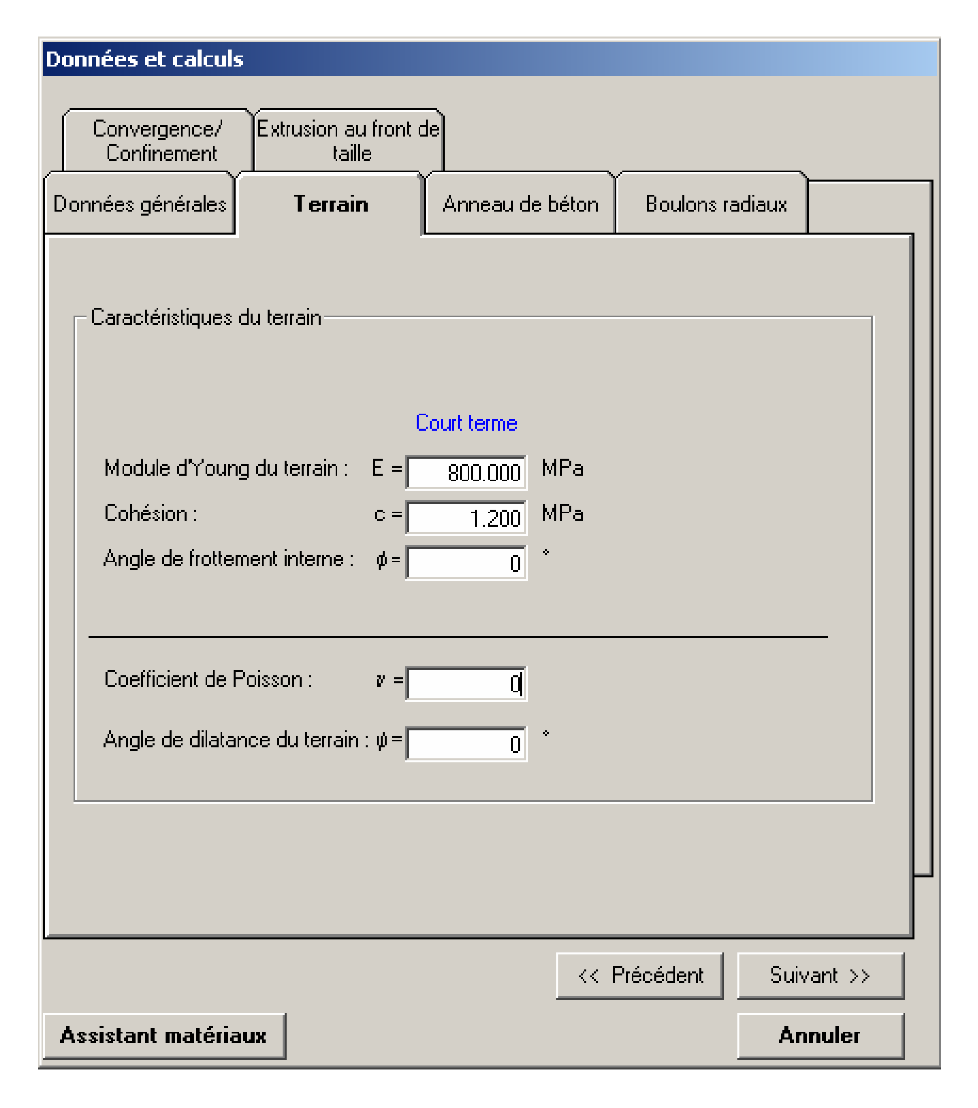


Figure 5 : Onglet "Terrain"

4.1.2 Boulons

Pour accéder aux caractéristiques des boulons, la case "Boulons au front" sur l'onglet "Données générales " doit être activée (Figure 6).

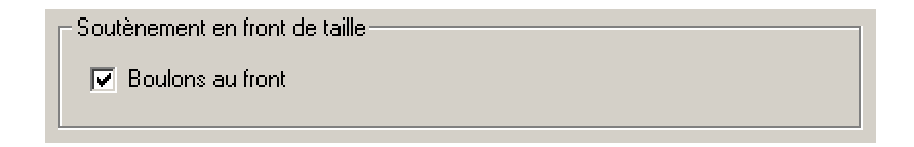


Figure 6 : Case à cocher " Boulon au front" sur l'onglet "Données générales".

Sur l'onglet "Extrusion au front de taille", la case à cocher "Calcul avec boulons" devient alors visible. Pour accéder aux caractéristiques des boulons il faut ensuite activer cette case (Figure7).

Données	Limites
A : Section d'un boulon	$0.0001m^2 \leq A \leq 0.01m^2$
E_b : Module d'élasticité	$100\ MPa \leq E_b \leq 200000\ MPa$
σ_{yb} : Limite d'élasticité	$100\ MPa \leq \sigma_{yb} \leq 1000\ MPa$
n : Nombre de boulons par m²	$0.01 \leq n \leq 5$

Tableau 2 : Données relatives aux boulons et leurs limites.

Une bibliothèque incluant les caractéristiques des principaux types de boulons en fibre verre se trouve dans la base de données de l' Assistant matériaux (voir partie B).

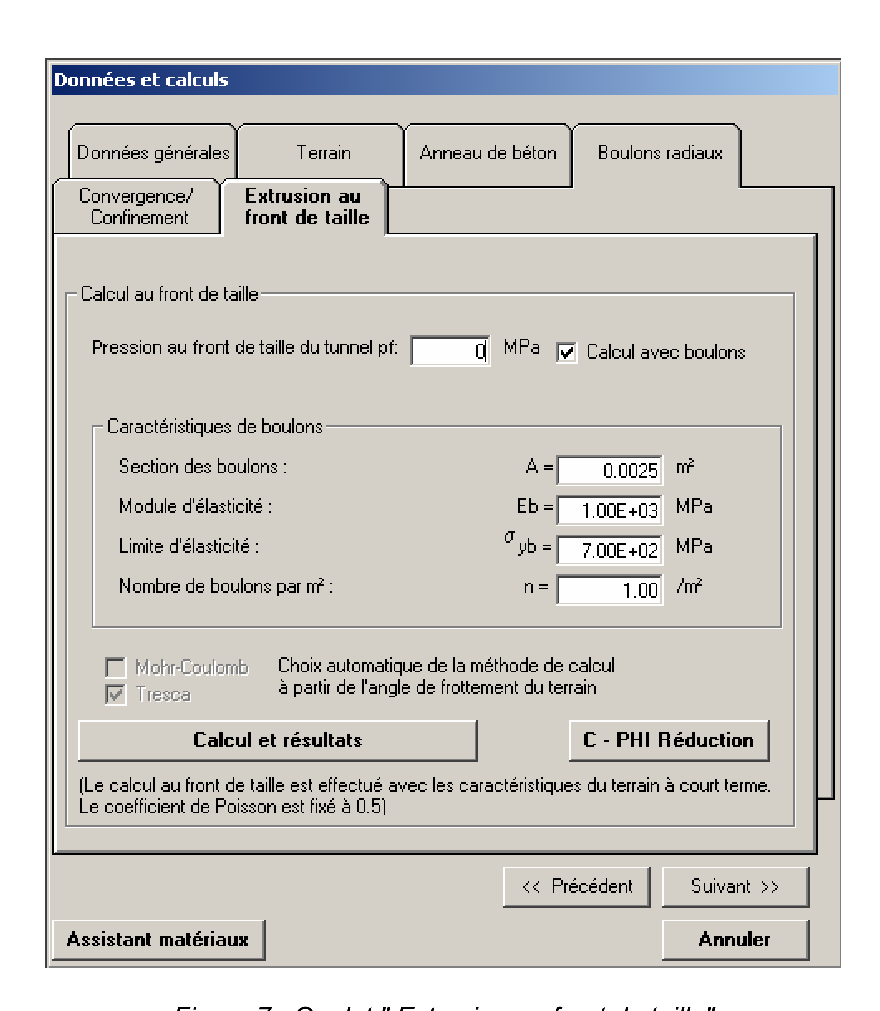


Figure 7 : Onglet " Extrusion au front de taille"

4.1.3 Pression au front

Pour prendre en compte une pression de confinement au front, entrez une valeur de p_f non nulle dans la case correspondante en haut du même onglet ($0 \leq p_f \leq \sigma_0$) (Figure 7).



Figure 8 : Application d'une pression au front.

4.2 Calculs et résultats

TunRen permet deux calculs différents :

- Calcul d'extrusion avec prise en compte éventuelle d'un boulonnage ou d'une pression de confinement au front.
- Calcul de c - φ réduction pour l'évaluation d'un facteur de sécurité du front.

4.2.1 Calcul d'extrusion

Les différents types de modélisations de tunnels dans TunRen sont les suivants :

- Pour modéliser un tunnel dans son état naturel (sans pression de confinement et sans boulonnage), la pression au front p_f doit rester nulle ($p_f = 0$) et il faut décocher la case "calcul avec boulons".
- Pour prendre en compte un renforcement du front par boulonnage, il faut cocher la case "calcul avec boulons" et saisir les caractéristiques des boulons.
- Pour prendre en compte une pression de confinement au front, il faut saisir la valeur de la pression p_f dans la case correspondante : $0 < p_f < \sigma_0$.
  En pratique, on ne peut pas considérer en même temps, une pression au front et un boulonnage. Il faut donc décocher la case "Calcul avec boulons".

Lancer ensuite le calcul en cliquant sur le bouton **Calcul et résultats** ou par le menu : Calculs et résultats\Extrusion au front de taille.

La fenêtre de résultats s'ouvre automatiquement à la fin du calcul.

Résultats au front de taille

Extrusion = f(taux de déconfinement)

Extrusion uf [m]

Lambda

Paramétrage graphique
Ordonnée
Contraintes[MPa] pour pf 0.300 — entre : 0 — (défaut)
Extrusion u [m] — et : 0.02 — Valider
W/R, Z/R ?
Traction [kN] — valeur max = 0.0123
Abscisse
Rayon de calcul [m] — entre : 0 — (défaut)
Lambda — et : 1 — Valider
valeur max = 1

Données
Terrain
E = 800.000 MPa σ = 2.400 MPa c = 1.200 MPa
R = 5 m ϕ = 0 ° ψ = 0 °
Soutènement (boulons)
σyb = 7.00E+02 MPa
A = 0.0025 m² Eb = 1.00E+03 MPa n = 1 u/m²

Résultats
pour λ = 0.88 — Extrusion uf = 0.0103 m
pour λ = 1.00 — Traction maximale des boulons = 10.11 kN

Imprimer — Presse-Papiers — Fermer

	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda				
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
1	3.00E-01	2.71E+00	4.09E-03	-2.05E-03	5.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	7.59E-01	3.17E+00	3.07E-03	-1.54E-03	5.50	0.0001	0.00	0.00	0.1102	0.01
3	1.14E+00	3.03E+00	1.89E+00	-9.47E-01	6.00	0.0002	0.00	0.00	0.2203	0.02
4	1.41E+00	2.90E+00	1.49E+00	-7.45E-01	6.50	0.0003	0.00	0.00	0.3305	0.03
5	1.60E+00	2.80E+00	1.19E+00	-5.96E-01	7.00	0.0004	0.00	0.00	0.4406	0.04
6	1.75E+00	2.72E+00	9.69E-01	-4.85E-01	7.50	0.0006	0.00	0.00	0.5508	0.05
7	1.87E+00	2.67E+00	7.99E-01	-3.99E-01	8.00	0.0007	0.00	0.00	0.6609	0.06
8	1.96E+00	2.62E+00	6.66E-01	-3.33E-01	8.50	0.0008	0.00	0.00	0.7711	0.07
9	2.03E+00	2.59E+00	5.61E-01	-2.81E-01	9.00	0.0009	0.00	0.00	0.8812	0.08
10	2.08E+00	2.56E+00	4.77E-01	-2.39E-01	9.50	0.0010	0.00	0.00	0.9914	0.09

Figure 9 : Fenêtre de résultats du calcul "Extrusion".

Cette fenêtre comporte 3 parties :

- A droite : le paramétrage du graphique, le rappel des données du terrain et des boulons et les principaux résultats
- A gauche : la fenêtre graphique pour visualiser les résultats
- En bas : le tableau des résultats avec l'ensemble des valeurs calculées

<u>Le paramétrage et la représentation graphique des résultats :</u>

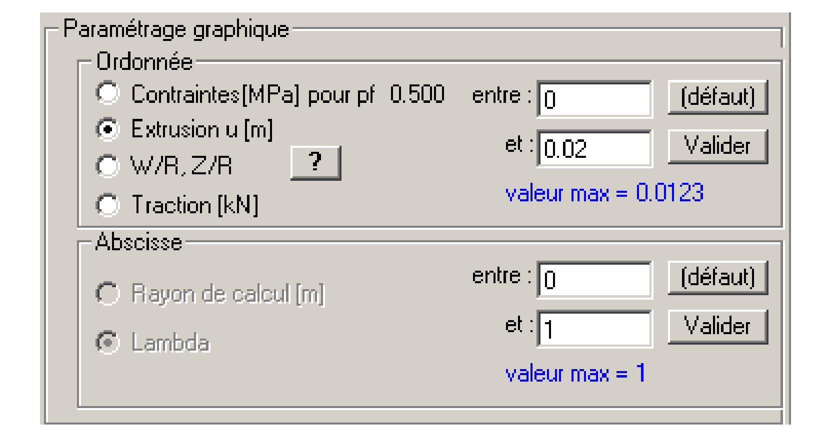


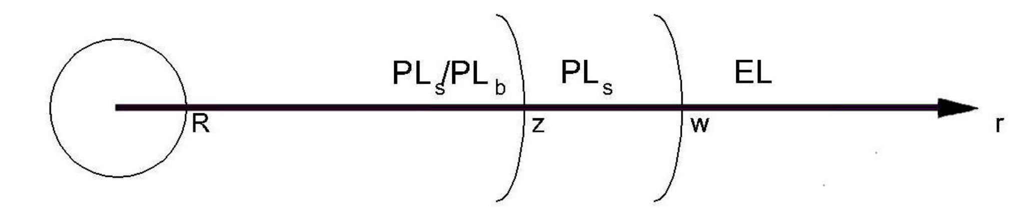
Figure 10 : Zone "Paramétrage graphique".

Vous avez accès à 4 graphiques différents :

- Contraintes – Rayon de calcul
- Extrusion – Taux de déconfinement (Figure 12)
- Rayons plastiques – Taux de déconfinement
- Traction dans les boulons – Taux de déconfinement

Il est possible de modifier les valeurs maximales et minimales des paramètres représentés sur chaque axe (zoom) pour mieux visualiser les résultats. N'oubliez pas de valider les modifications. Les valeurs maximales calculées pour les paramètres actifs sont toujours rappelées (valeurs en bleu).

Une figure d'aide qui explique les différents rayons plastiques est accessible par le bouton [?].



PL_s= Plastification du sol PL_b= Plastification des boulons EL = Milieu entièrement élastique

Figure 11 : Figure d'aide des rayons plastiques.

W = w/R : Rayon plastique correspondant à la plastification du terrain
Z = z/R : Rayon plastique correspondant à la plastification des boulons

Du fait de plastification du terrain avant la plastification des boulons, z reste toujours inférieur à w (z < w). Si le terrain ou les boulons restent en élasticité, les rayons plastiques restent nuls.

Les fonctions de la barre de boutons en haut du graphique sont rappelées dans la partie B.

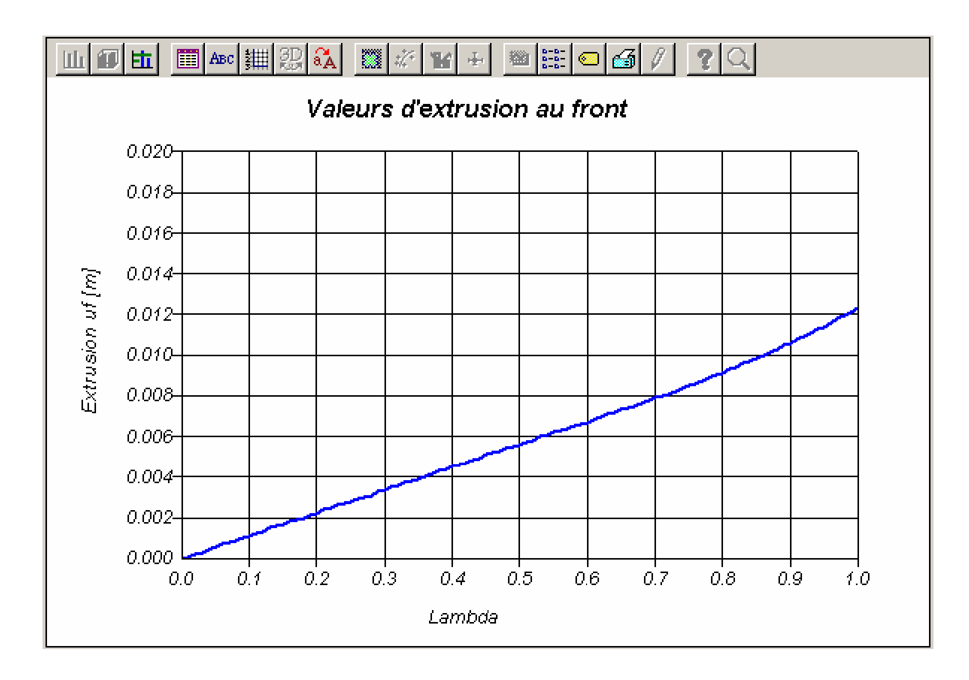


Figure 12 : Zone graphique.

Les principaux résultats :

Dans cette partie, l'extrusion finale du front et la traction maximale des boulons (dans le cas d'une prise en compte des boulons dans le calcul) sont données pour deux valeurs de déconfinement (Figure 13) :

- $\lambda < 1$: front mou totalement déconfiné, valable uniquement en cas d'application d'une pression au front du tunnel (λ est calculé automatiquement à partir de la valeur p_f saisie pour la pression au front)
- $\lambda = 1$: déconfinement total du terrain (sans prise en compte d'une pression au front).

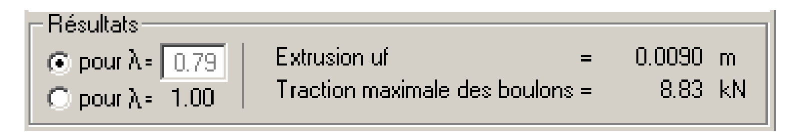


Figure 13 : Zone "Résultats".

Le tableau avec le détail des résultats

Ce tableau (Figure 15) comporte deux parties :

- la partie gauche (en bleu), donne toutes les valeurs calculées en fonction du rayon de calcul r [m] (origine à l'axe du tunnel), pour un taux de déconfinement fixe, correspondant à la pression exercée au front de taille :

- Contrainte radiale σ_R
- Contrainte orthoradiale σ_ϑ
- Déformation radiale ε_R
- Déformation orthoradiale ε_ϑ

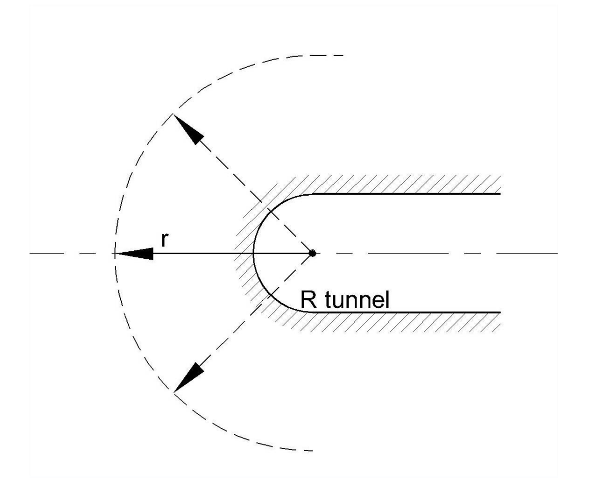
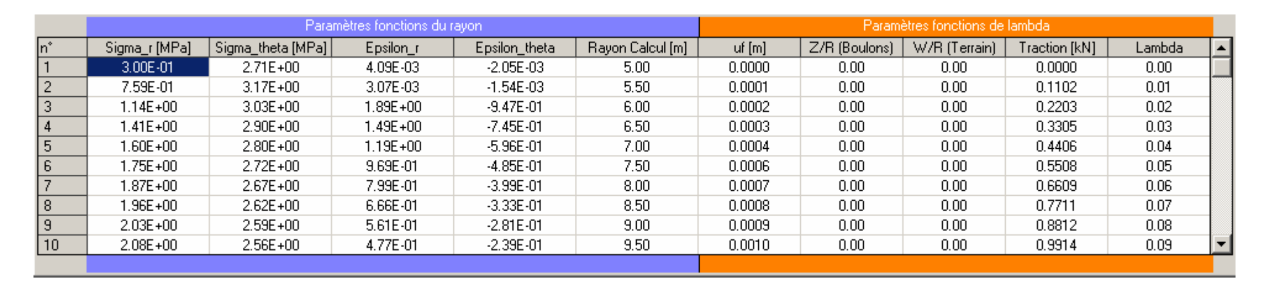


Figure 14 : Direction d'exploitation des contraintes et des déformations



	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda				
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
1	3.00E-01	2.71E+00	4.09E-03	-2.05E-03	5.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	7.59E-01	3.17E+00	3.07E-03	-1.54E-03	5.50	0.0001	0.00	0.00	0.1102	0.01
3	1.14E+00	3.03E+00	1.89E+00	-9.47E-01	6.00	0.0002	0.00	0.00	0.2203	0.02
4	1.41E+00	2.90E+00	1.49E+00	-7.45E-01	6.50	0.0003	0.00	0.00	0.3305	0.03
5	1.60E+00	2.80E+00	1.19E+00	-5.96E-01	7.00	0.0004	0.00	0.00	0.4406	0.04
6	1.75E+00	2.72E+00	9.69E-01	-4.85E-01	7.50	0.0006	0.00	0.00	0.5508	0.05
7	1.87E+00	2.67E+00	7.99E-01	-3.99E-01	8.00	0.0007	0.00	0.00	0.6609	0.06
8	1.96E+00	2.62E+00	6.66E-01	-3.33E-01	8.50	0.0008	0.00	0.00	0.7711	0.07
9	2.03E+00	2.59E+00	5.61E-01	-2.81E-01	9.00	0.0009	0.00	0.00	0.8812	0.08
10	2.08E+00	2.56E+00	4.77E-01	-2.39E-01	9.50	0.0010	0.00	0.00	0.9914	0.09

Figure 15 : Tableau de l'ensemble des résultats.

- La partie droite (orange) donne toutes les valeurs calculées en fonction du taux de déconfinement, c'est-à-dire dans la direction de l'axe du tunnel (voir hypothèse de déconfinement, partie D 3.1) :

  - Déplacement d'extrusion u_f dans la direction axiale du tunnel
  - Rayon plastique des boulons Z = z/R rapporté au rayon du tunnel
  - Rayon plastique du terrain W = w/R rapporté au rayon du tunnel
  - Traction dans les boulons T

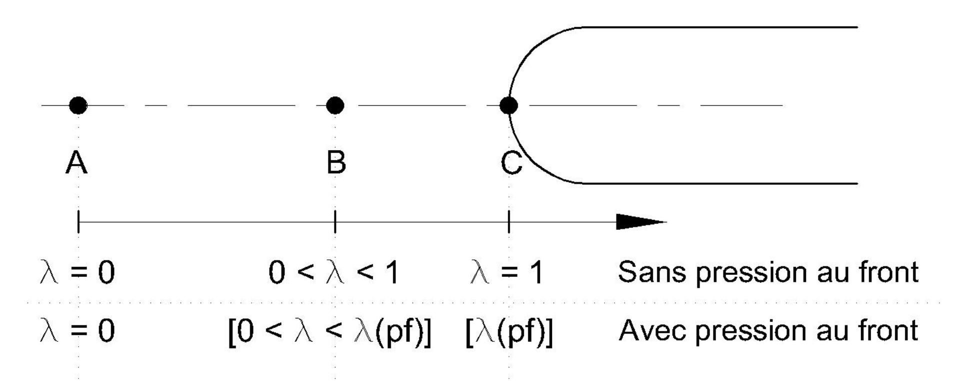


Figure 16 : Direction d'exploitation des déplacements dans l'axe, des rayons plastiques et de la traction

4.2.2 Calcul du coefficient de sécurité « C-Phi Reduction »

Le calcul est fait en réduisant progressivement par un facteur de réduction F les paramètres de résistance du terrain (c, φ), ainsi que des renforcements (σ_{yb}) dans le cas d'un boulonnage au front. En pratique, TunRen fait le calcul "Extrusion" successivement avec les valeurs c/F, tan φ/F (et σ_{yb}/F s'il y a des boulons) pour F variant dans une plage à définir par l'utilisateur, entre 1 et F_{max}, pour un nombre donné de pas de calcul :

$$1 \; ; \; 1 + (F_{max}-1))/(n-1) \; ; \; 1 + 2.(F_{max}-1)/(n-1) \; , \; \ldots \; ; \; F_{max}$$

Sur la courbe caractéristique des déformations en fonction du facteur de réduction F on s'intéresse à la valeur du facteur de réduction correspondant àune déformation relative au front u_f/R de 2,5% et de 5%. Dans le cas où apparaît une plastification des boulons, le facteur de réduction F correspondant à l'apparition de cette plastification est également calculé.

<u>*Saisie des données*</u>

Cliquez sur le bouton **C - PHI Réduction** dans la fenêtre "Extrusion au front de taille" pour accéder à la fenêtre de calcul de c - φ réduction.
Seule la plage du facteur de réduction F (1 à 5 par défaut) et le nombre de pas de calcul sont à définir.
Attention : plus on définit de pas de calcul (nombre de pas de calcul égal à 11 par défaut), les calculs sont longs.

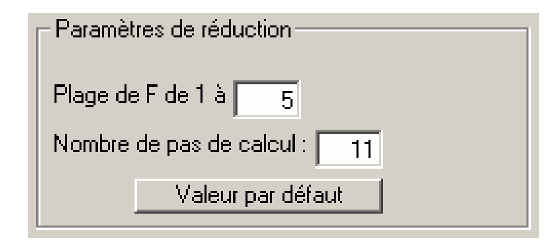


Figure 17 : Paramètres de réduction

Calcul et résultats

Lancer le calcul en cliquant sur le bouton **Calculer**.

Le tableau et le graphique des résultats sont automatiquement mis à jour à la fin du calcul.

C - PHI Réduction

C - Phi Réduction

Extrusion uf [mm]

uf/R [%]

Facteur de Réduction F

Echelle
uf
uf/R
min : 0
max : 284
par défaut
Valider

Rappel des hypothèses
R [m] = 5
σ_0 [MPa] = 2.400
E [MPa] = 800.000
c [MPa] = 1.200 (réduit)
phi [°] = 0 (réduit)
σ_{yb}[MPa] = 700 (réduit)

Paramètres de réduction
Plage de F de 1 à 5
Nombre de pas de calcul : 11
Valeur par défaut

Coefficient de sécurité
F [2.5%] = 4.0
F [5%] = 4.8
F [boulon] = -

Calculer
Imprimer
Presse-Papiers
Fermer

Pas	F	c [MPa]	phi [°]	uf [mm]	uf/R [%]	Sigmayb [MPa]
1	1.00	1.2000	0.00	10	0.21	700
2	1.40	0.8571	0.00	12	0.25	500
3	1.80	0.6667	0.00	16	0.33	389
4	2.20	0.5455	0.00	23	0.45	318
5	2.60	0.4615	0.00	32	0.64	269
6	3.00	0.4000	0.00	47	0.93	233
7	3.40	0.3529	0.00	68	1.36	206
8	3.80	0.3158	0.00	100	1.99	184
9	4.20	0.2857	0.00	144	2.89	167
10	4.60	0.2609	0.00	205	4.11	152
11	5.00	0.2400	0.00	284	5.69	140

Figure 18 : Fenêtre de calcul de c - φ réduction.

La courbe caractéristique de la stabilité au front est affichée sur l'espace graphique, avec :

- En axe x : Facteur de réduction F
- En axe y (gauche) : Extrusion u_f
- En axe y (droite) : Extrusion relative du tunnel u_f/R

Il est possible de définir des valeurs maximales et minimales pour les axes y (à droite du graphique) afin de mieux visualiser les résultats. N'oubliez pas de valider les valeurs saisies.

Tous les résultats sont regroupés dans un tableau sous le graphique. Pour chaque pas de calcul F, on trouve les valeurs suivantes des caractéristiques réduites prises en compte :

– $c = c/F$	Cohésion
– $\tan \varphi = (\tan \varphi)/F$	Angle de frottement
– $\sigma_{yb} = \sigma_{yb}/F$	Limite élastique des boulons
– u_f	Extrusion u_f
– u_f/R	Extrusion relative au rayon du tunnel

Le coefficient de sécurité est affiché à droite du tableau des résultats.
On retrouve les valeurs de F correspondant à des déformations relatives u_f/R du front de 2.5% et 5%.
Dans le cas d'une plastification des boulons, le facteur de réduction correspondant à leur limite de plastification est également présenté à cet endroit.

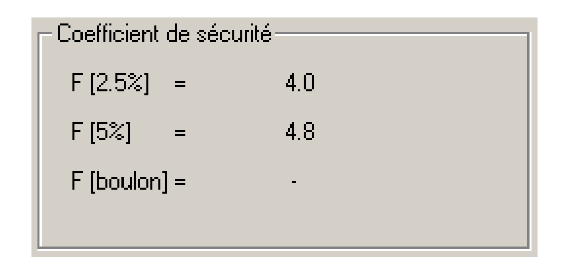


Figure 19 : Zone "Coefficient de sécurité".

5 EXEMPLES

5.1 Tunnel dans son état naturel

5.1.1 Calcul EXTRUSION

1) Lancer TunRen ou ouvrir un nouveau projet. La fenêtre "Titre – Unités – Commentaires" (Figure 20) est ouverte automatiquement au départ de chaque nouveau projet . Entrez les informations générales du projet et choisissez les unités. N'oubliez pas de valider cette fenêtre.

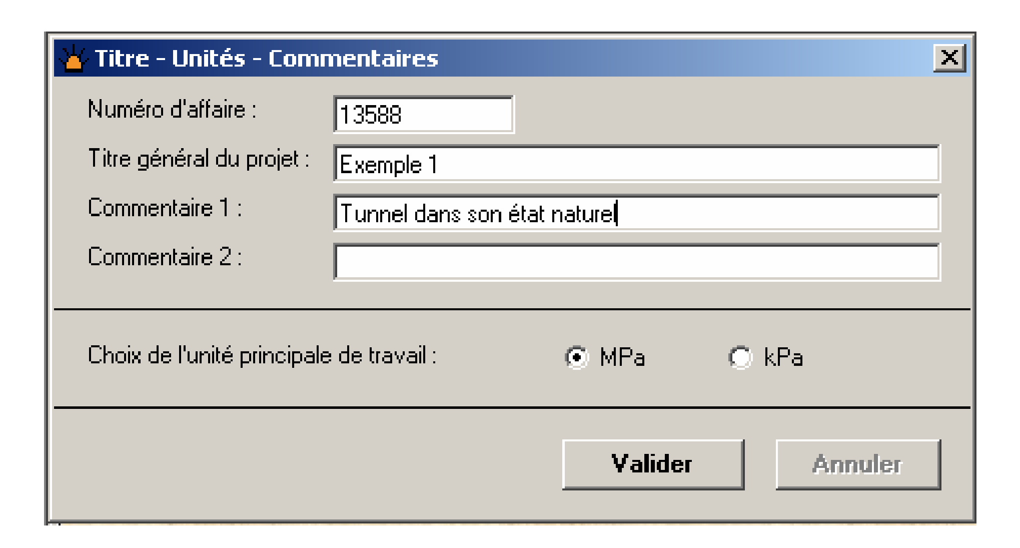


Figure 20 : Fenêtre "Titre – Unités – Commentaires".

2) Entrez les caractéristiques du tunnel (le rayon R et la contrainte initiale σ_0 dans l'axe du tunnel) sur l'onglet "Données générales" (Figure 21). Les soutènements radiaux ne sont pas pris en compte dans le calcul EXTRUSION, donc on garde l'option "Aucun soutènement" cochée. Un renforcement du front par boulonnage n'étant pas prévu dans cet exemple, on garde la case "Boulons au front de taille" décochée. Le calcul d'extrusion étant mené avec les caractéristiques du terrain à court terme, la case "calcul à court terme seulement" doit être cochée.

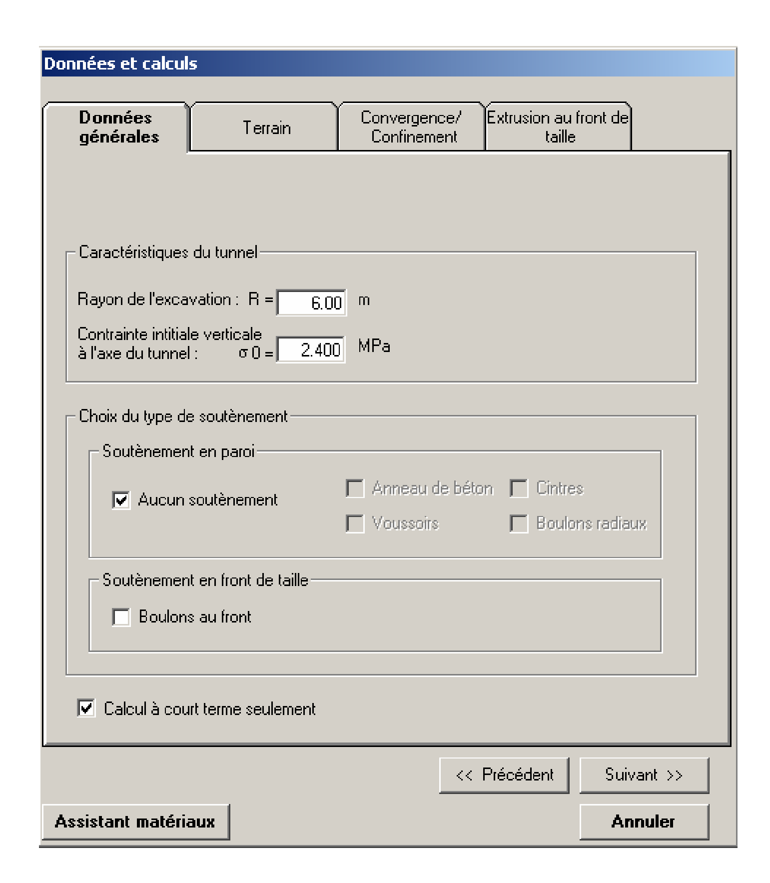


Figure 21 : Saisie des données.

3) La saisie des caractéristiques du terrain se fait sur l'onglet "Terrain" (Figure 22). Entrez les valeurs données sur la figure : E, c, φ, ψ. Nous travaillons avec un modèle de TRESCA : φ = 0 (visible dans les cases à cocher non modifiables) sur l'onglet de calcul "Extrusion en front de taille". Le coefficient de Poisson est pris automatiquement à 0.5 dans le calcul, ici on peut garder 0 (la valeur de ν saisie sur cet onglet sert seulement pour les calculs "Convergence –Confinement").

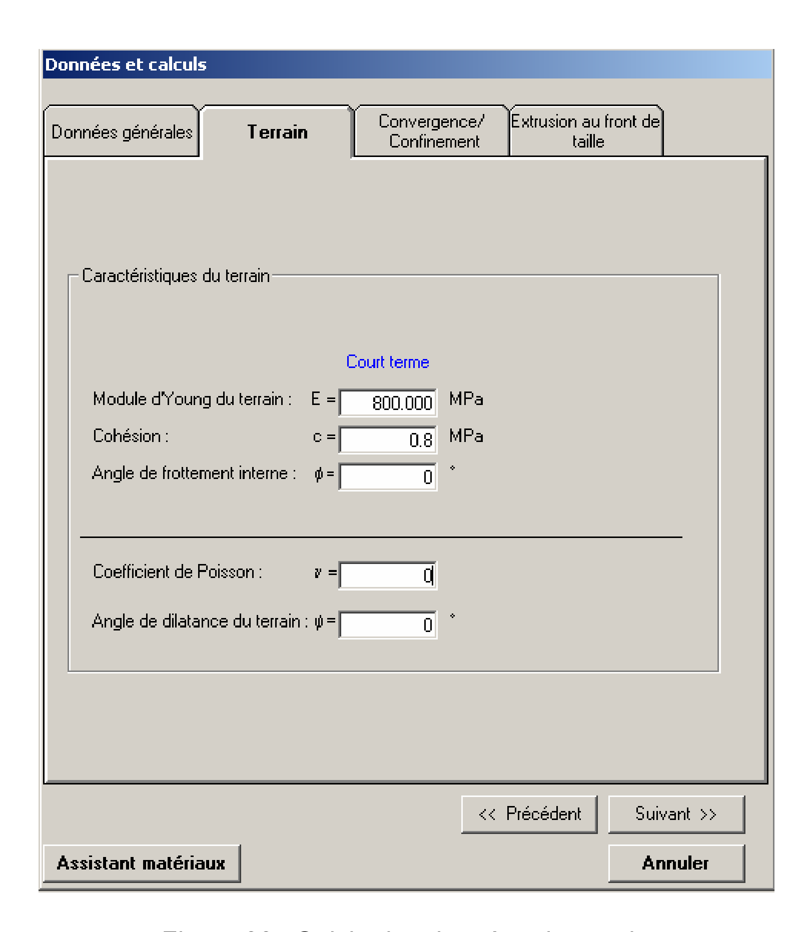


Figure 22 : Saisie des données du terrain.

4) Pour lancer le calcul, activez l'onglet "Extrusion au front de taille" (Figure 23). Aucune pression pour stabiliser le front n'est appliquée : on garde la valeur 0. Ensuite, lancez le calcul en cliquant sur le bouton "Calcul et résultats".

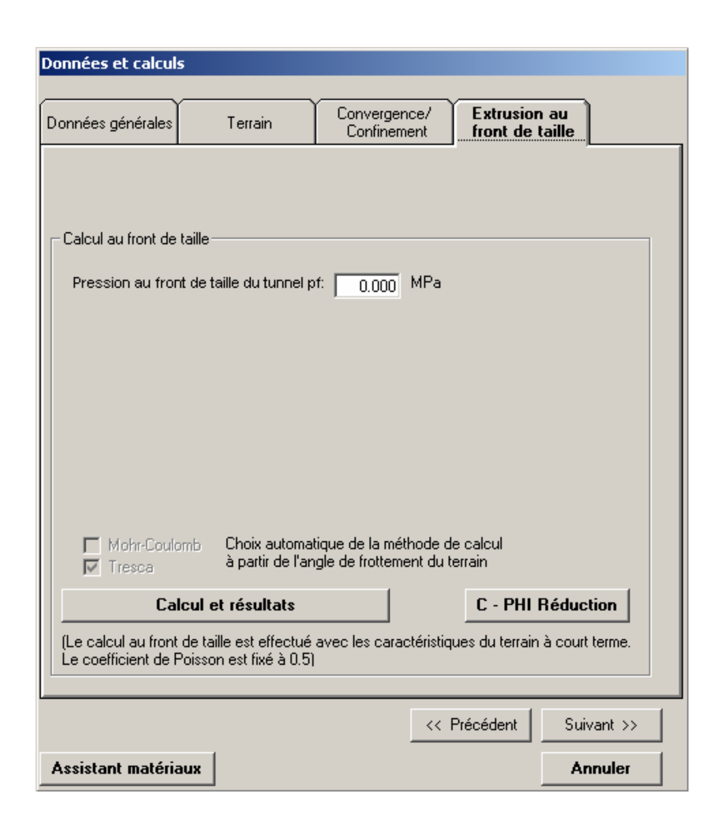
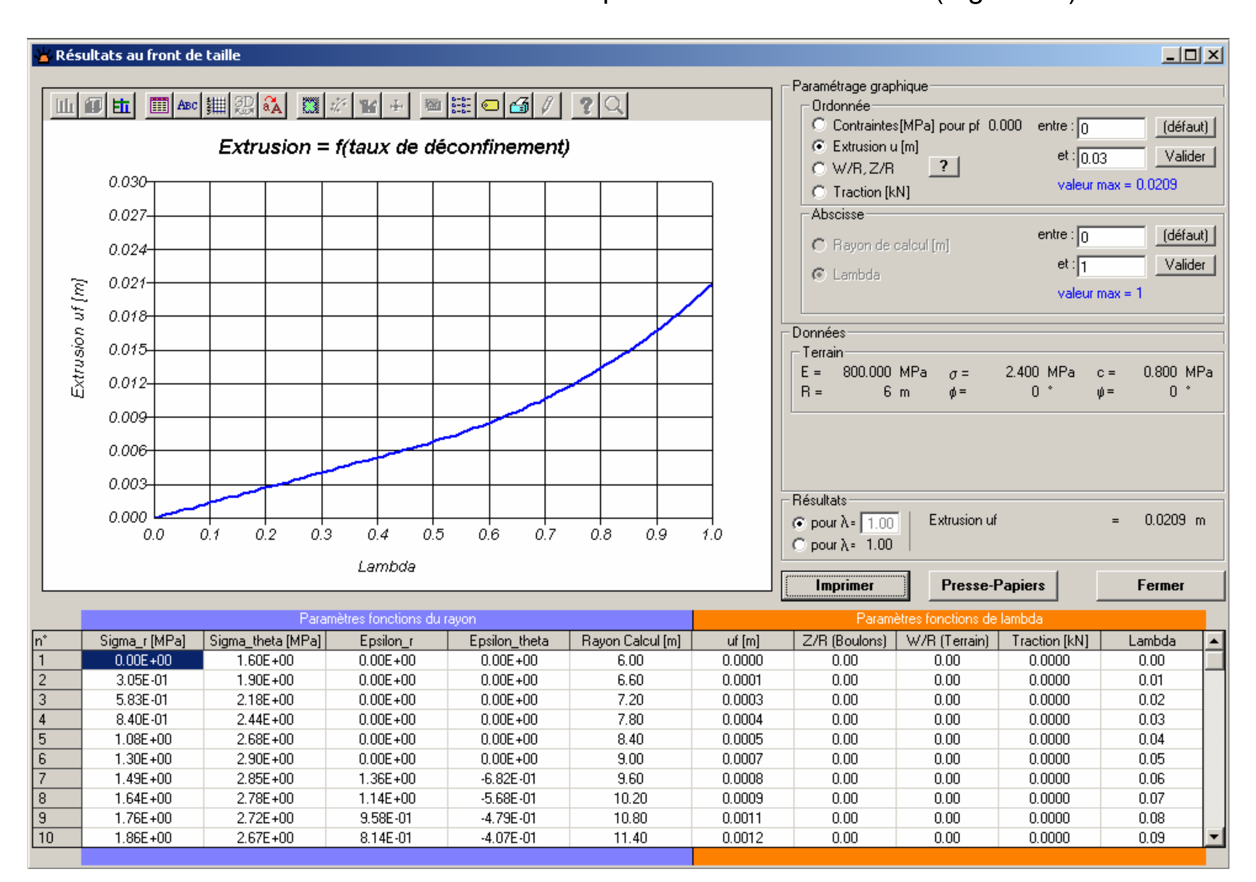


Figure 23 : Lancer le calcul.

La fenêtre de résultats est ouverte automatiquement à la fin du calcul (Figure 24).



	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda					
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
1	0.00E+00	1.60E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	3.05E-01	1.90E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.60	0.0001	0.00	0.00	0.0000	0.01
3	5.83E-01	2.18E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.20	0.0003	0.00	0.00	0.0000	0.02
4	8.40E-01	2.44E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.80	0.0004	0.00	0.00	0.0000	0.03
5	1.08E+00	2.68E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.40	0.0005	0.00	0.00	0.0000	0.04
6	1.30E+00	2.90E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.00	0.0007	0.00	0.00	0.0000	0.05
7	1.49E+00	2.85E+00	1.36E+00	-6.82E-01	9.60	0.0008	0.00	0.00	0.0000	0.06
8	1.64E+00	2.78E+00	1.14E+00	-5.68E-01	10.20	0.0009	0.00	0.00	0.0000	0.07
9	1.76E+00	2.72E+00	9.58E-01	-4.79E-01	10.80	0.0011	0.00	0.00	0.0000	0.08
10	1.86E+00	2.67E+00	8.14E-01	-4.07E-01	11.40	0.0012	0.00	0.00	0.0000	0.09

Figure 24 : Fenêtre de résultats.

L'extrusion au front de taille (pour un déconfinement total : λ = 1) est de 20.9 mm (visible sur les graphiques (Figures 24 et 25), dans l'espace "Résultats" à droite du graphique (Figures 24 et 26) et aussi dans le tableau de résultats sur la ligne correspondant à λ = 1. Le développement de l'extrusion à l'approche du tunnel, lorsque λ augmente de 0 à 1, est également visible sur le graphique et dans le tableau.

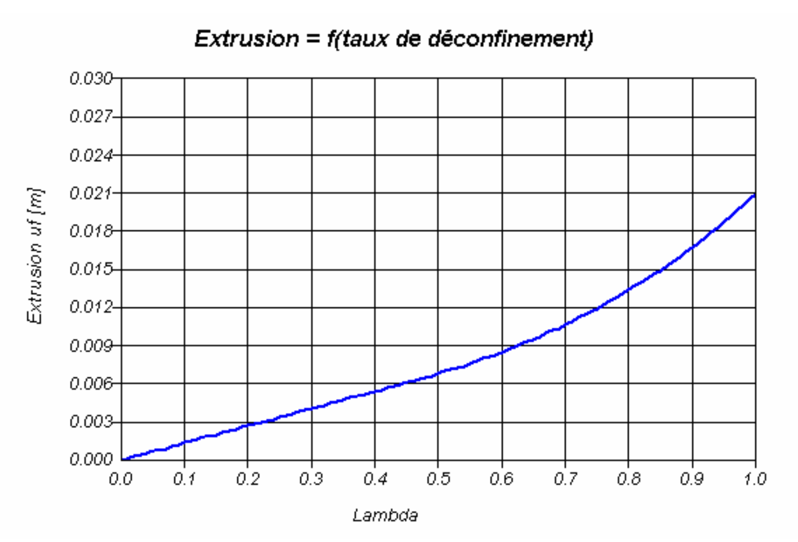


Figure 25 : Graphique des résultats.

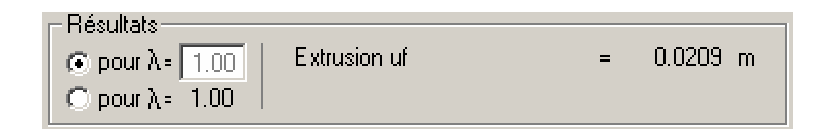
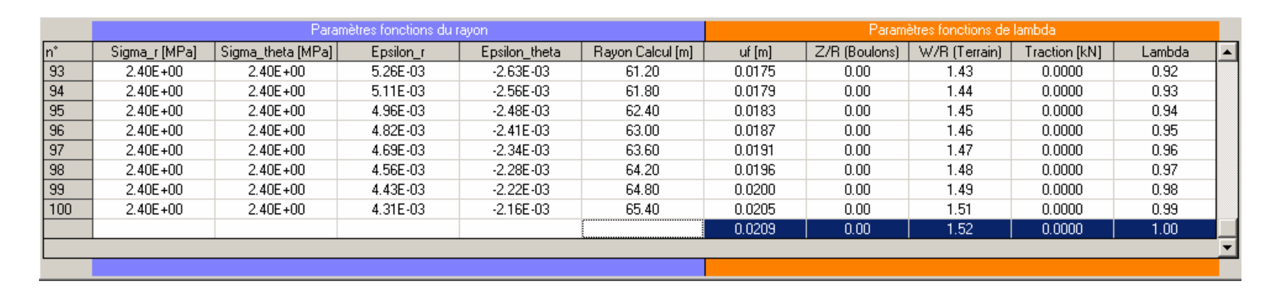


Figure 26 : Zone " Résultats".



	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda				
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
93	2.40E+00	2.40E+00	5.26E-03	-2.63E-03	61.20	0.0175	0.00	1.43	0.0000	0.92
94	2.40E+00	2.40E+00	5.11E-03	-2.56E-03	61.80	0.0179	0.00	1.44	0.0000	0.93
95	2.40E+00	2.40E+00	4.96E-03	-2.48E-03	62.40	0.0183	0.00	1.45	0.0000	0.94
96	2.40E+00	2.40E+00	4.82E-03	-2.41E-03	63.00	0.0187	0.00	1.46	0.0000	0.95
97	2.40E+00	2.40E+00	4.69E-03	-2.34E-03	63.60	0.0191	0.00	1.47	0.0000	0.96
98	2.40E+00	2.40E+00	4.56E-03	-2.28E-03	64.20	0.0196	0.00	1.48	0.0000	0.97
99	2.40E+00	2.40E+00	4.43E-03	-2.22E-03	64.80	0.0200	0.00	1.49	0.0000	0.98
100	2.40E+00	2.40E+00	4.31E-03	-2.16E-03	65.40	0.0205	0.00	1.51	0.0000	0.99
						0.0209	0.00	1.52	0.0000	1.00

Figure 27 : Tableau des résultats.

La plastification du terrain est visible à partir du déconfinement de λ = 0.45 (Figure 28, Figure 29 ou Figure 25, début de la partie non linéaire).

Le rayon plastique relatif du terrain (au front de taille) w/R est égal à 1.52 pour un déconfinement total λ = 1 (Figure 28), ce qui correspond à une distance de R*1.52 = 9.12 m par rapport au centre du tunnel.

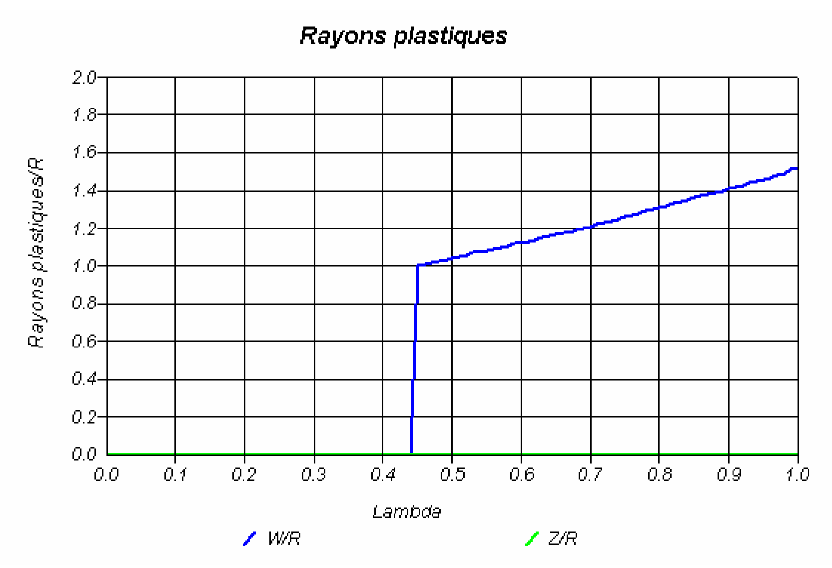


Figure 28 : Graphique des rayons plastiques.

	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda				
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
41	2.37E+00	2.41E+00	4.47E-02	-2.23E-02	30.00	0.0054	0.00	0.00	0.0000	0.40
42	2.37E+00	2.41E+00	4.21E-02	-2.10E-02	30.60	0.0055	0.00	0.00	0.0000	0.41
43	2.37E+00	2.41E+00	3.97E-02	-1.99E-02	31.20	0.0057	0.00	0.00	0.0000	0.42
44	2.37E+00	2.41E+00	3.75E-02	-1.88E-02	31.80	0.0058	0.00	0.00	0.0000	0.43
45	2.38E+00	2.41E+00	3.55E-02	-1.77E-02	32.40	0.0059	0.00	0.00	0.0000	0.44
46	2.38E+00	2.41E+00	3.36E-02	-1.68E-02	33.00	0.0061	0.00	1.00	0.0000	0.45
47	2.38E+00	2.41E+00	3.18E-02	-1.59E-02	33.60	0.0062	0.00	1.01	0.0000	0.46
48	2.38E+00	2.41E+00	3.02E-02	-1.51E-02	34.20	0.0064	0.00	1.02	0.0000	0.47
49	2.38E+00	2.41E+00	2.86E-02	-1.43E-02	34.80	0.0065	0.00	1.03	0.0000	0.48
50	2.38E+00	2.41E+00	2.72E-02	-1.36E-02	35.40	0.0066	0.00	1.03	0.0000	0.49

Figure 29 : Début d'une plastification.

Aucun renforcement n'étant mis en place au front, la traction et le rayon plastique z des boulons du modèle théorique demeurent nuls.

Sur le graphique des contraintes pour $\lambda = 1$ (au front de taille), on constate que l'influence du creusement devient négligeable à une distance d'environ 30 m du tunnel (Figure 30).

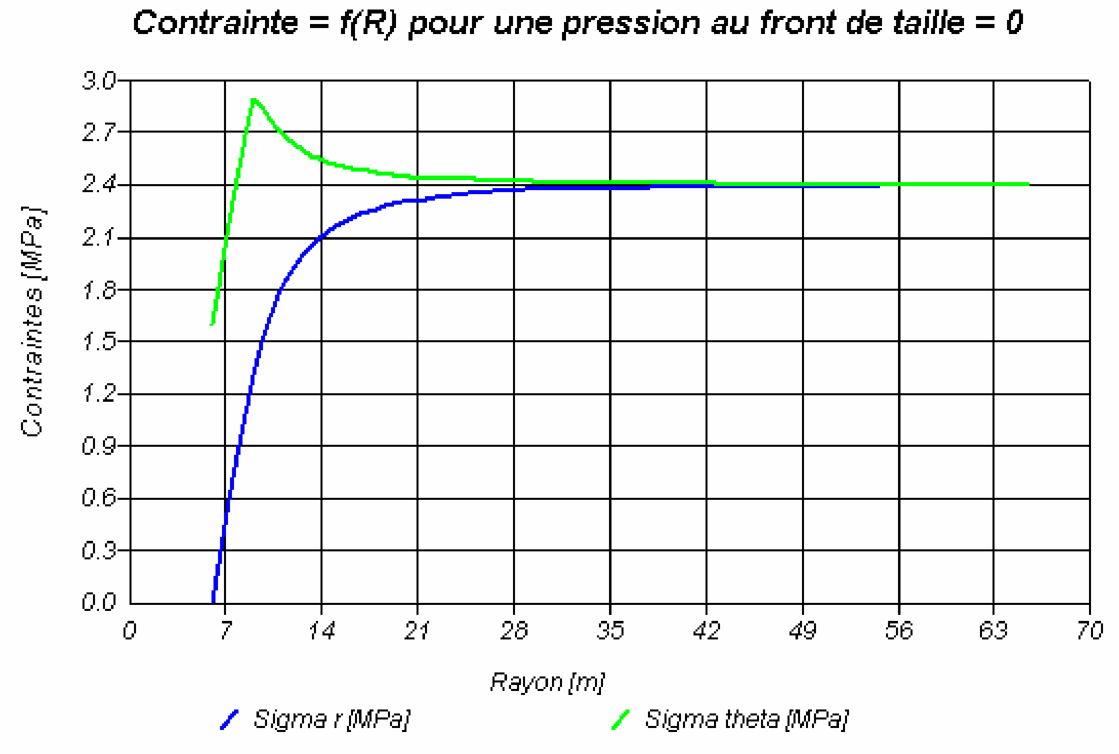
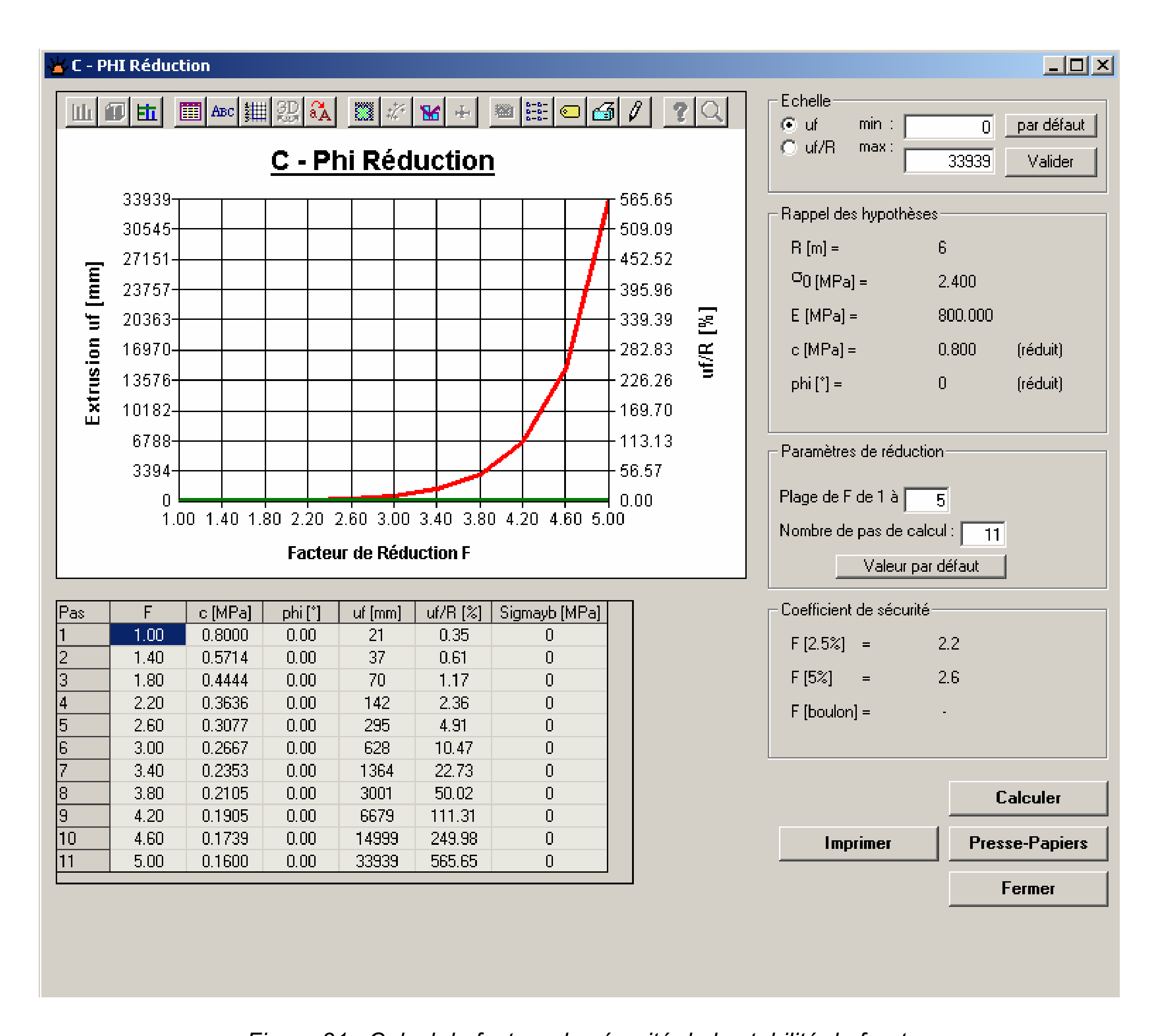


Figure 30 : Distribution des contraintes.

5.1.2 Calcul de C-Phi Réduction

Pour effectuer un calcul de "C-Phi Réduction", cliquez sur le bouton C - PHI Réduction. Sur la fenêtre de calcul qui s'ouvre automatiquement paramétrez, la réduction. Par défaut, la plage de F est choisie de 1 à 5, et le nombre de pas de calcul est de 11. Gardez ces valeurs et lancez le calcul en appuyant sur Calculer. A la fin de cette opération qui peut prendre quelques minutes, le tableau des résultats ainsi que le graphique sont mis à jour.

On obtient un facteur de sécurité pour la stabilité du front compris entre 2.2 (u_f/R = 2,5%) et 2.6 (u_f/R = 5%).



Pas	F	c [MPa]	phi [°]	uf [mm]	uf/R [%]	Sigmayb [MPa]
1	1.00	0.8000	0.00	21	0.35	0
2	1.40	0.5714	0.00	37	0.61	0
3	1.80	0.4444	0.00	70	1.17	0
4	2.20	0.3636	0.00	142	2.36	0
5	2.60	0.3077	0.00	295	4.91	0
6	3.00	0.2667	0.00	628	10.47	0
7	3.40	0.2353	0.00	1364	22.73	0
8	3.80	0.2105	0.00	3001	50.02	0
9	4.20	0.1905	0.00	6679	111.31	0
10	4.60	0.1739	0.00	14999	249.98	0
11	5.00	0.1600	0.00	33939	565.65	0

Figure 31 : Calcul du facteur de sécurité de la stabilité du front.

5.2 Tunnel avec boulonnage au front

5.2.1 Extrusion

Nous reprenons le même modèle de l'exemple "Tunnel à l'état naturel" (§ 5.1.). Pour avoir accès au boulons, cochez la case "Boulons au front" sur l'onglet "Données générales" (Figure 32). Puis, sur l'onglet "Extrusion au front de taille", la case "Calcul avec boulons" apparaît ; elle est par défaut cochée ce qui rend visible les cases de saisie des caractéristiques des boulons (Figure 33). Entrez les données des boulons et lancez le calcul.

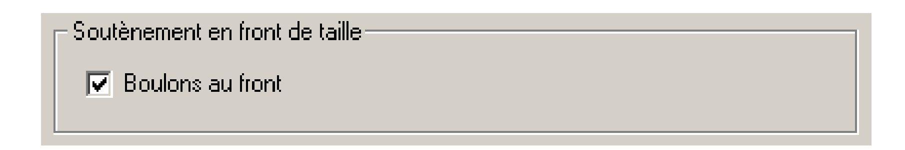


Figure 32 : Case à cocher pour prendre en compte un boulonnage au front.

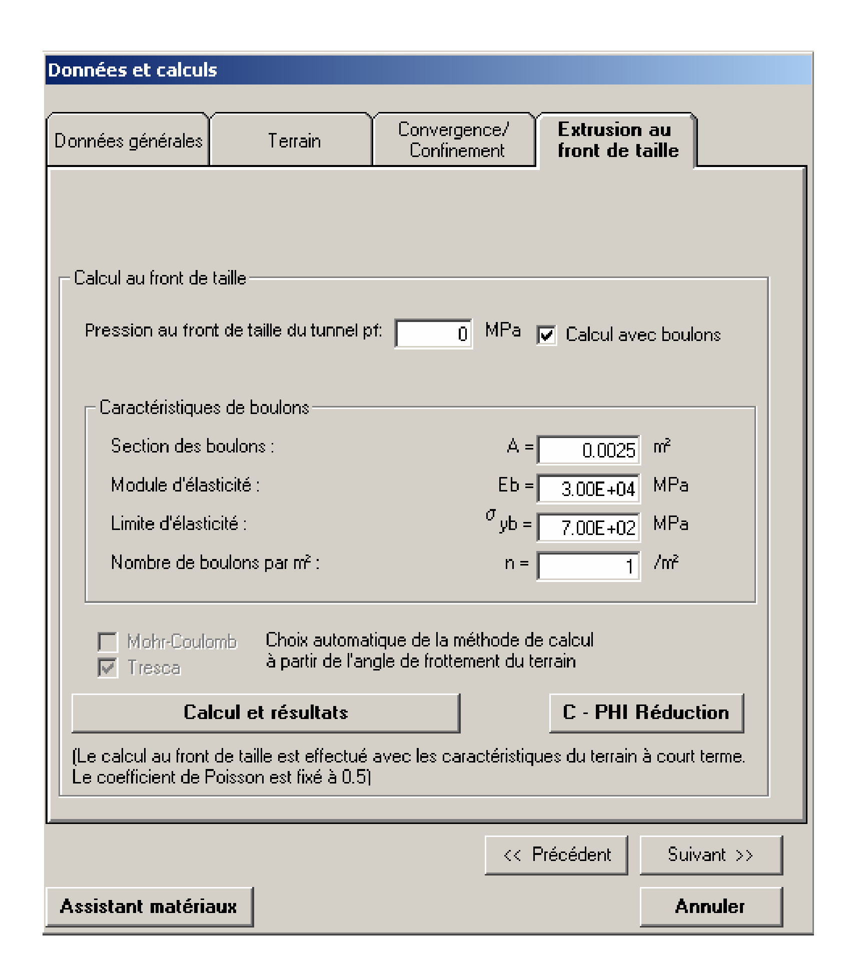
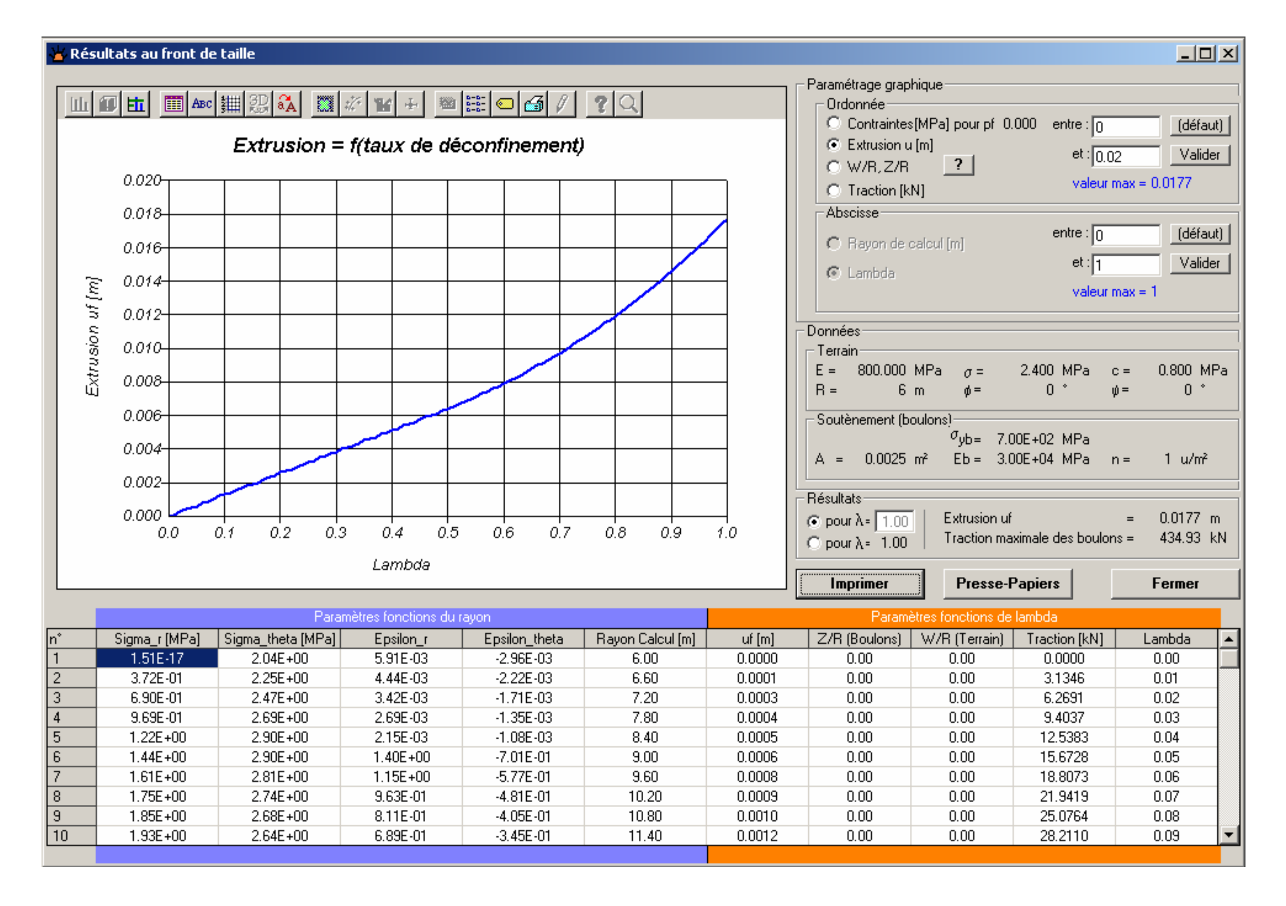


Figure 33 : Caractéristiques des boulons au front.



n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
1	1.51E-17	2.04E+00	5.91E-03	-2.96E-03	6.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	3.72E-01	2.25E+00	4.44E-03	-2.22E-03	6.60	0.0001	0.00	0.00	3.1346	0.01
3	6.90E-01	2.47E+00	3.42E-03	-1.71E-03	7.20	0.0003	0.00	0.00	6.2691	0.02
4	9.69E-01	2.69E+00	2.69E-03	-1.35E-03	7.80	0.0004	0.00	0.00	9.4037	0.03
5	1.22E+00	2.90E+00	2.15E-03	-1.08E-03	8.40	0.0005	0.00	0.00	12.5383	0.04
6	1.44E+00	2.90E+00	1.40E+00	-7.01E-01	9.00	0.0006	0.00	0.00	15.6728	0.05
7	1.61E+00	2.81E+00	1.15E+00	-5.77E-01	9.60	0.0008	0.00	0.00	18.8073	0.06
8	1.75E+00	2.74E+00	9.63E-01	-4.81E-01	10.20	0.0009	0.00	0.00	21.9419	0.07
9	1.85E+00	2.68E+00	8.11E-01	-4.05E-01	10.80	0.0010	0.00	0.00	25.0764	0.08
10	1.93E+00	2.64E+00	6.89E-01	-3.45E-01	11.40	0.0012	0.00	0.00	28.2110	0.09

Figure 34 : Fenêtre de résultats.

Nous constatons que l'extrusion au front u_f en comparaison avec le calcul sans boulonnage est passée de 20.9 mm à 17.7 mm (Figure 34).

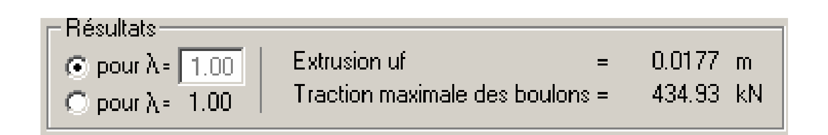


Figure 35 :Zone "Résultats".

La traction maximale dans les boulons au front est de 435 kN (Figures 35 et 36). La limite élastique σ_{yb} (700 MPa) n'est pas atteinte : 435 kN / 0.0025 m² = 174 MPa : le rayon plastique relatif z/R des boulons reste nul (Figure 37).

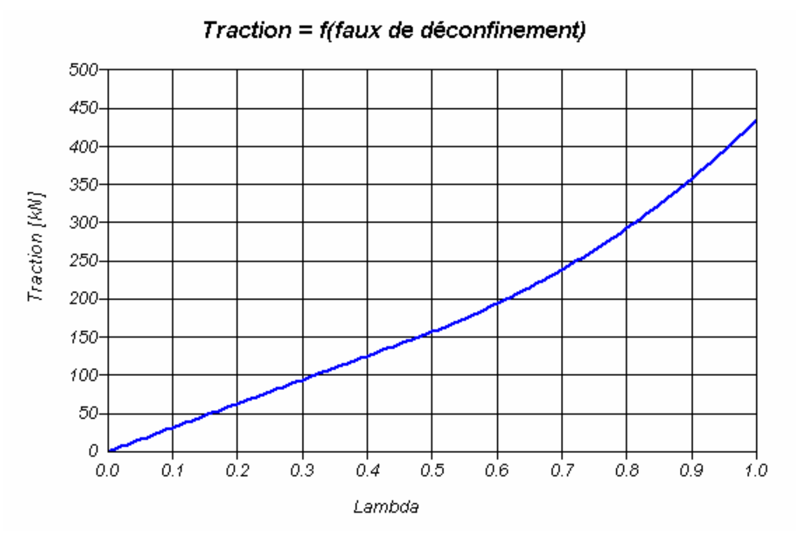


Figure 36 : Traction des boulons.

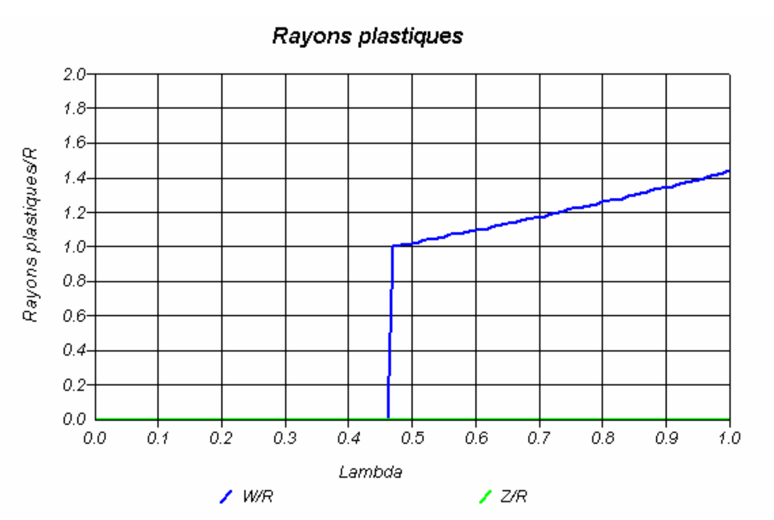


Figure 37 : Rayons plastiques w = w/R et Z = Z/R

Si l'on compare avec le tunnel non renforcé, on observe que le sol se plastifie un peu plus tard, c'est-à-dire pour un déconfinement plus avancé : λ (w = 1) = 0.47 (au lieu de 0.45) (Figure 38). Au front de taille, le terrain est plastifié jusqu'à une distance de 1.44*R = 8.64 m (au lieu de 9.12 m avec un front non soutenu) (Figure 37).

	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda				
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
41	2.37E+00	2.41E+00	3.78E-02	-1.89E-02	30.00	0.0051	0.00	0.00	125.3826	0.40
42	2.38E+00	2.41E+00	3.57E-02	-1.78E-02	30.60	0.0052	0.00	0.00	128.5169	0.41
43	2.38E+00	2.41E+00	3.36E-02	-1.68E-02	31.20	0.0054	0.00	0.00	131.6512	0.42
44	2.38E+00	2.41E+00	3.18E-02	-1.59E-02	31.80	0.0055	0.00	0.00	134.7855	0.43
45	2.38E+00	2.41E+00	3.00E-02	-1.50E-02	32.40	0.0056	0.00	0.00	137.9208	0.44
46	2.38E+00	2.41E+00	2.84E-02	-1.42E-02	33.00	0.0058	0.00	0.00	141.0550	0.45
47	2.38E+00	2.41E+00	2.69E-02	-1.35E-02	33.60	0.0059	0.00	0.00	144.1893	0.46
48	2.38E+00	2.41E+00	2.55E-02	-1.28E-02	34.20	0.0060	0.00	1.00	147.3256	0.47
49	2.38E+00	2.41E+00	2.42E-02	-1.21E-02	34.80	0.0061	0.00	1.01	150.4952	0.48
50	2.38E+00	2.41E+00	2.30E-02	-1.15E-02	35.40	0.0063	0.00	1.01	153.7266	0.49

Figure 38 : Moment de la plastification du terrain.

La courbe des contraintes montre une légère augmentation des contraintes proches du front par rapport aux résultats de l'exemple 1 (§ 5.1). De plus, une légère diminution du rayon d'influence du creusement devient visible quand on compare des valeurs du tableau ; cette différence est toutefois trop faible pour être visible sur le graphique.

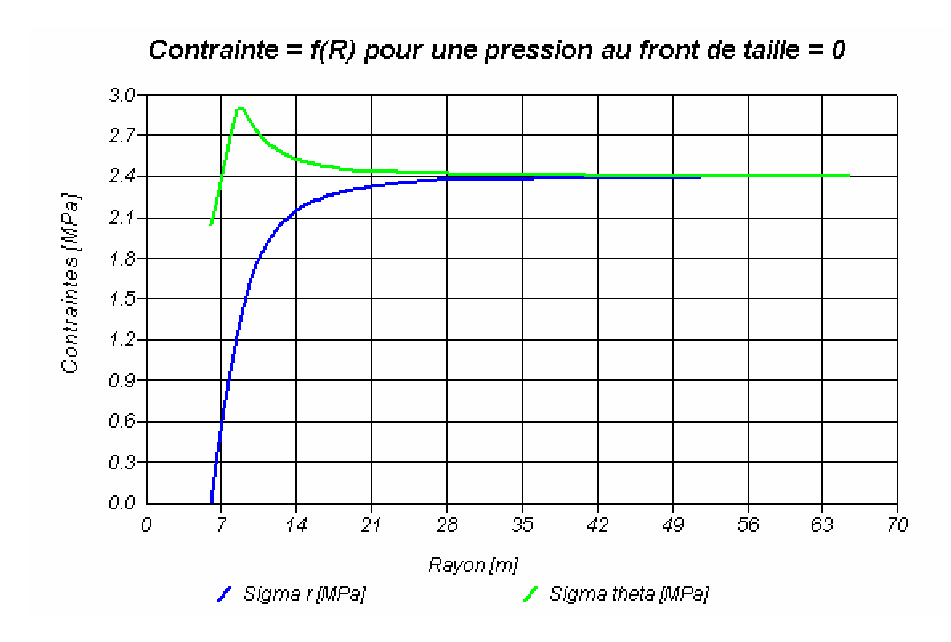


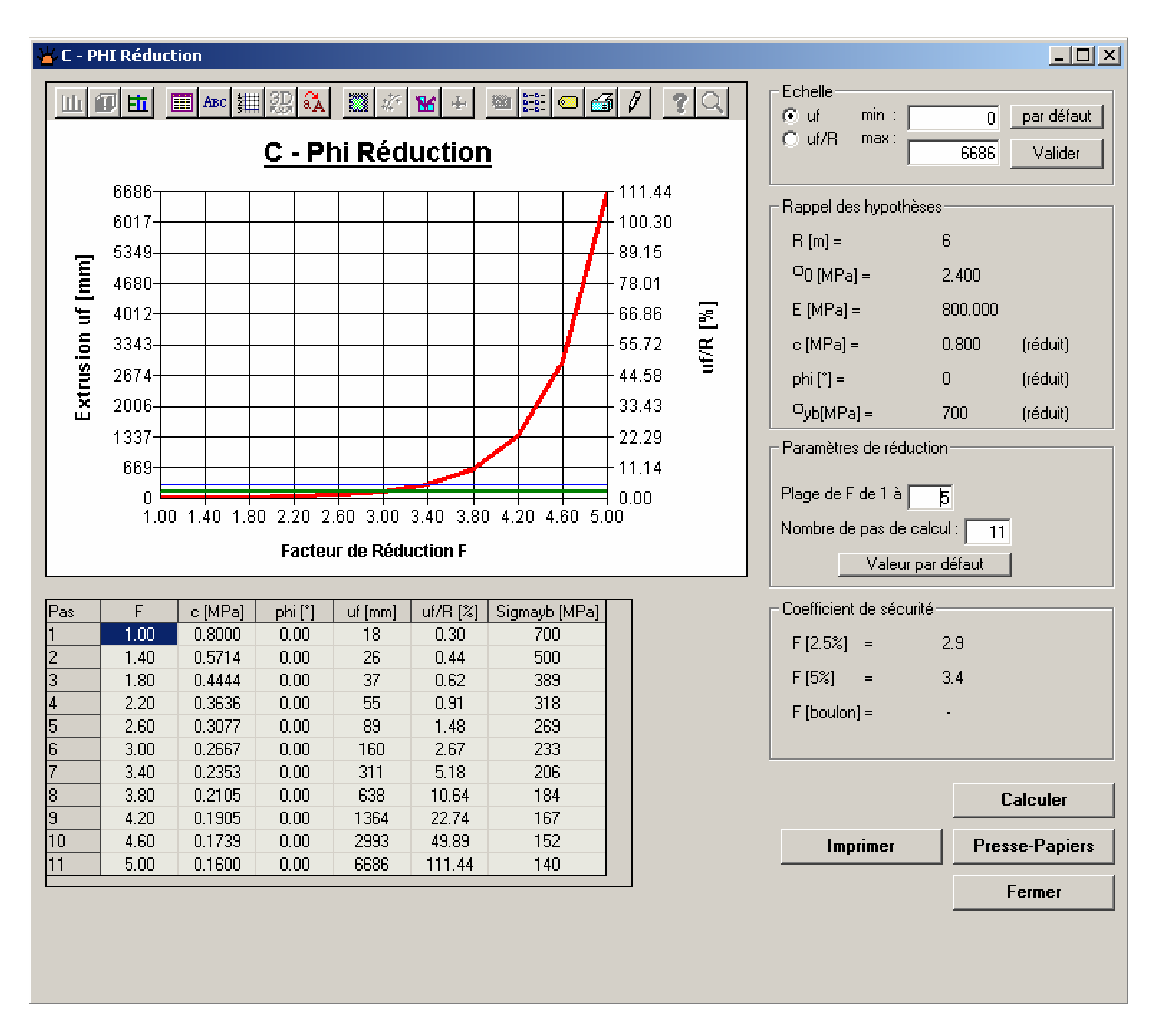
Figure 39 : Distribution des contraintes.

5.2.2 C-Phi Réduction

Lancez le calcul de c - φ réduction comme dans le cas précédent avec les valeurs de F et le nombre de pas de calcul proposés par défaut. Le facteur de réduction dans un calcul avec boulonnage au front s'applique non seulement aux caractéristiques de rigidité du terrain (c et φ) mais aussi à la résistance des boulons σ_{yb} (limite élastique) (voir dans le tableau de résultats Figure 40).

Le boulonnage augmente le coefficient de sécurité : F_1 = 2.9 (u_f/R = 2,5%) et F_2 = 3.4 (u_f/R = 5%) au lieu de 2.2 à 2.6 (sans boulons) (Figure 41).

La plastification des boulons n'a pas eu lieu pendant le calcul. Dans le cas contraire, la valeur de u_f/R de la phase de réduction correspondant à la plastification serait affichée sous les valeurs des coefficients de sécurité F_1 (u_f/R) = 2,5% et F_2 (u_f/R) = 5%.



Pas	F	c [MPa]	phi [°]	uf [mm]	uf/R [%]	Sigmayb [MPa]
1	1.00	0.8000	0.00	18	0.30	700
2	1.40	0.5714	0.00	26	0.44	500
3	1.80	0.4444	0.00	37	0.62	389
4	2.20	0.3636	0.00	55	0.91	318
5	2.60	0.3077	0.00	89	1.48	269
6	3.00	0.2667	0.00	160	2.67	233
7	3.40	0.2353	0.00	311	5.18	206
8	3.80	0.2105	0.00	638	10.64	184
9	4.20	0.1905	0.00	1364	22.74	167
10	4.60	0.1739	0.00	2993	49.89	152
11	5.00	0.1600	0.00	6686	111.44	140

Figure 40 : Calcul du coefficient de sécurité du front avec boulonnage.

Coefficient de sécurité

F [2.5%] = 2.9

F [5%] = 3.4

F [boulon] = -

Figure 41 : Coefficient de sécurité.

5.3 Tunnel stabilisé par une pression au front

5.3.1 EXTRUSION

Nous reprenons les données du premier calcul. Sur l'onglet "Extrusion au front de taille", entrez maintenant la pression que vous appliquez au front (ici 0.3 MPa) et lancez le calcul d'extrusion (Figure 42).

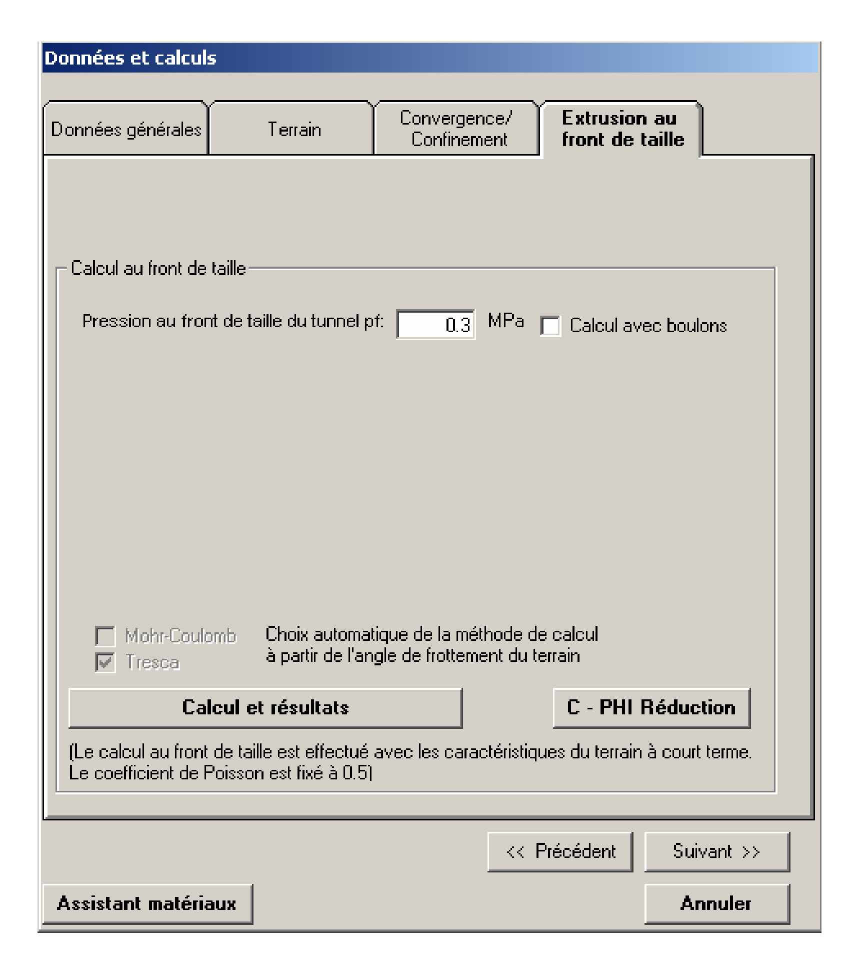
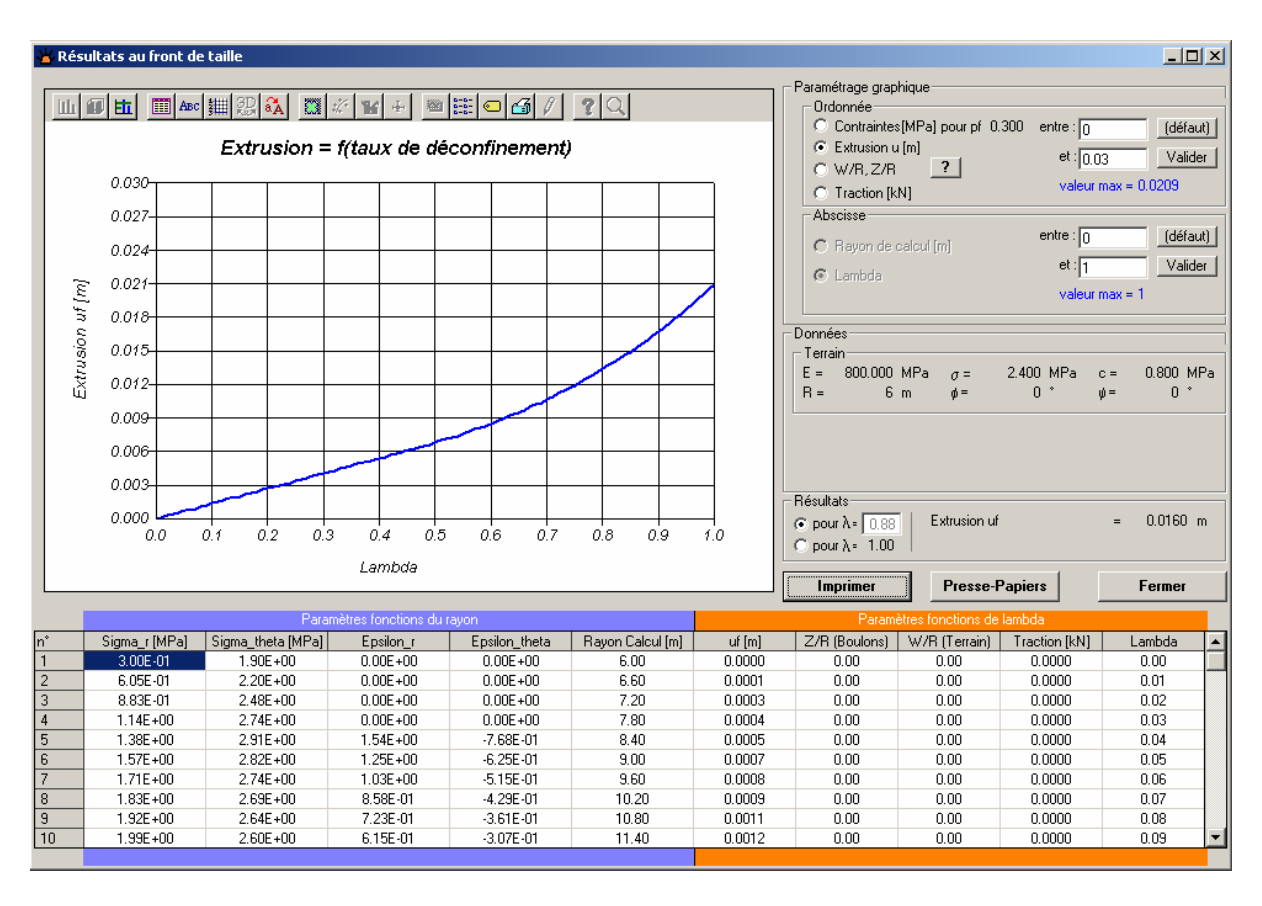


Figure 42 : Prise en compte d'une pression au front.

L'application de cette pression de confinement conduit dans notre cas à une diminution de l'extrusion au front de 20.9 mm (λ = 1; déconfinement total) à 16 mm ($\lambda = (\sigma_0 - P_f)/\ \sigma_0$ = (2.4-0.3)/2.4 = 0.88 ; déconfinement partiel) (Figures 44 et 45).



	Paramètres fonctions du rayon					Paramètres fonctions de lambda				
n°	Sigma_r [MPa]	Sigma_theta [MPa]	Epsilon_r	Epsilon_theta	Rayon Calcul [m]	uf [m]	Z/R (Boulons)	W/R (Terrain)	Traction [kN]	Lambda
1	3.00E-01	1.90E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.00	0.0000	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	6.05E-01	2.20E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.60	0.0001	0.00	0.00	0.0000	0.01
3	8.83E-01	2.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.20	0.0003	0.00	0.00	0.0000	0.02
4	1.14E+00	2.74E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.80	0.0004	0.00	0.00	0.0000	0.03
5	1.38E+00	2.91E+00	1.54E+00	-7.68E-01	8.40	0.0005	0.00	0.00	0.0000	0.04
6	1.57E+00	2.82E+00	1.25E+00	-6.25E-01	9.00	0.0007	0.00	0.00	0.0000	0.05
7	1.71E+00	2.74E+00	1.03E+00	-5.15E-01	9.60	0.0008	0.00	0.00	0.0000	0.06
8	1.83E+00	2.69E+00	8.58E-01	-4.29E-01	10.20	0.0009	0.00	0.00	0.0000	0.07
9	1.92E+00	2.64E+00	7.23E-01	-3.61E-01	10.80	0.0011	0.00	0.00	0.0000	0.08
10	1.99E+00	2.60E+00	6.15E-01	-3.07E-01	11.40	0.0012	0.00	0.00	0.0000	0.09

Figure 43 : Fenêtre des résultats pour un calcul avec une pression appliquée au front.

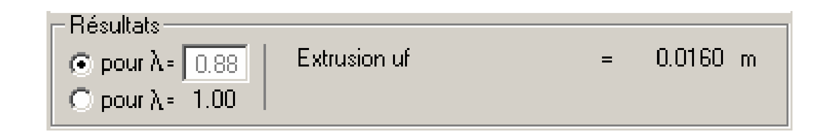


Figure 44 : Déconfinement partiel correspondant à la pression appliquée.

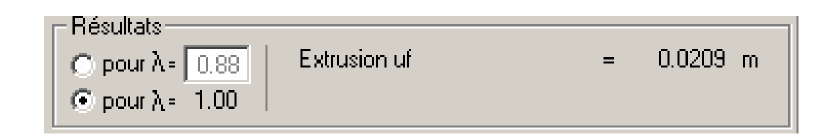


Figure 45 : Déconfinement total sans prise en compte d'une pression au front.

On retrouve au niveau de la distribution des contraintes l'augmentation au voisinage du front du tunnel, et le rayon d'influence du creusement a encore diminué (Figure 46).

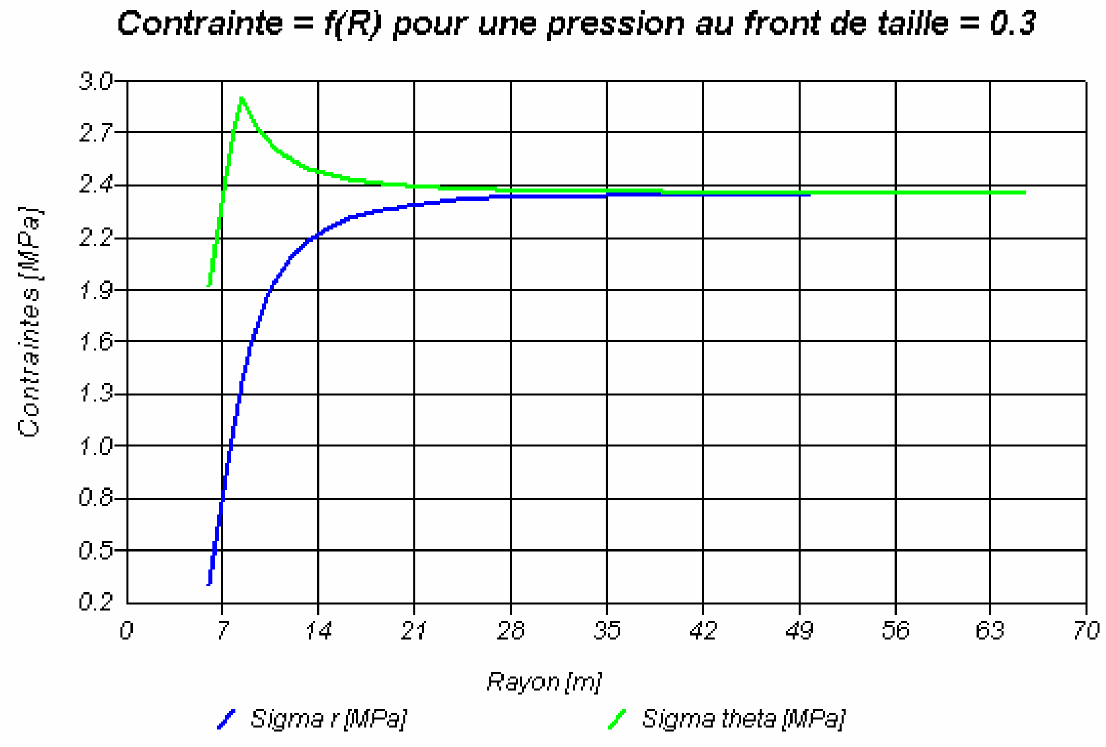
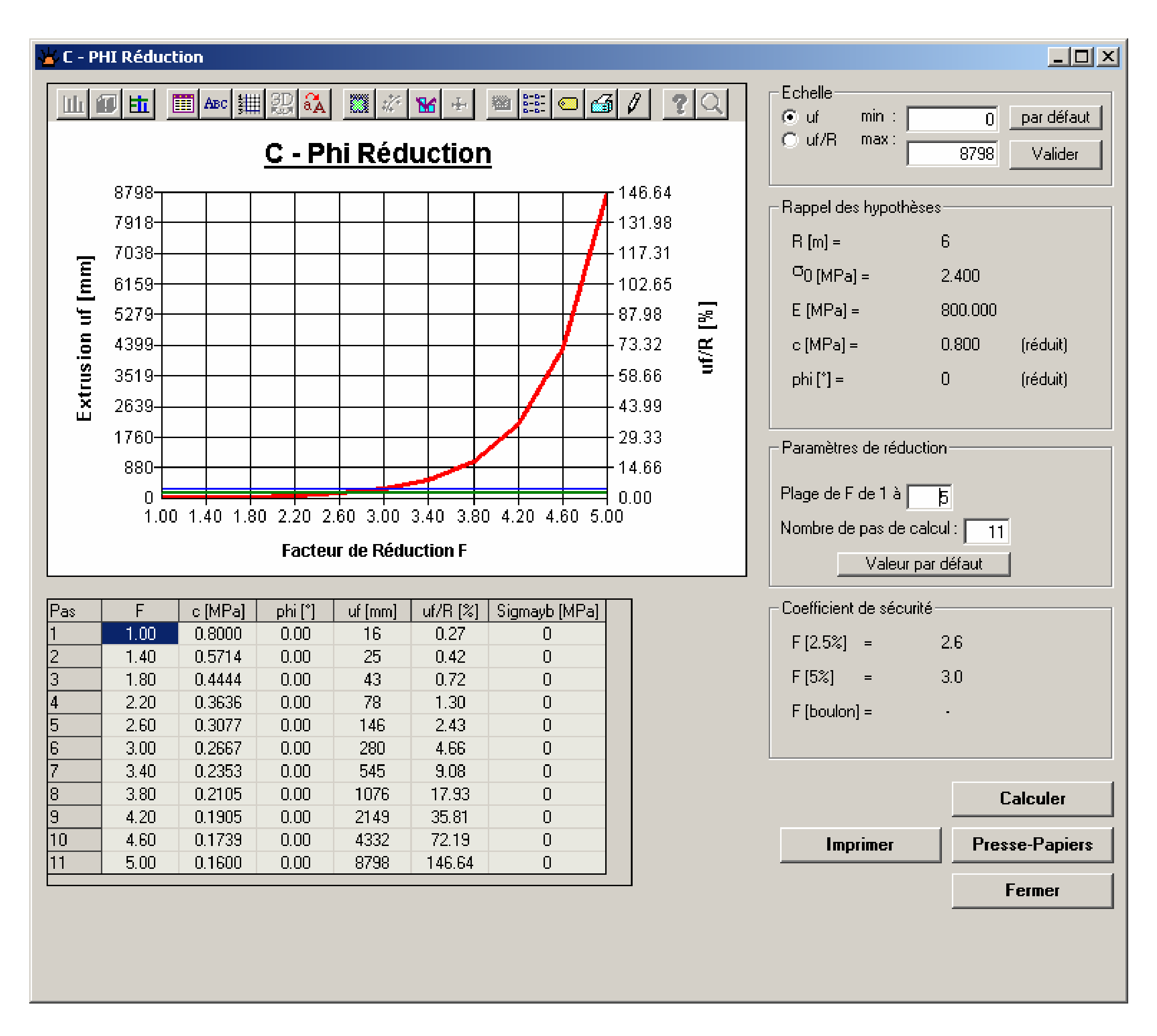


Figure 46 : Distribution des contraintes pour une pression de confinement p_f = 0.3 MPa au front.

5.3.2 C-Phi Réduction

Accédez au calcul de C – Phi Réduction" en appuyant sur le bouton **C - PHI Réduction**. Gardez le paramétrage de F et le nombre de pas par défaut comme dans le cas précédent. En prenant en compte une pression de confinement au front, les coefficients de sécurité augmentent à $F_1 = 2.6$ (u_f/R = 2,5%) et $F_2 = 3.0$ (u_f/R = 5%) au lieu 2.2 et 2.6 respectivement pour le tunnel non soutenu (Figure 47).



Pas	F	c [MPa]	phi [°]	uf [mm]	uf/R [%]	Sigmayb [MPa]
1	1.00	0.8000	0.00	16	0.27	0
2	1.40	0.5714	0.00	25	0.42	0
3	1.80	0.4444	0.00	43	0.72	0
4	2.20	0.3636	0.00	78	1.30	0
5	2.60	0.3077	0.00	146	2.43	0
6	3.00	0.2667	0.00	280	4.66	0
7	3.40	0.2353	0.00	545	9.08	0
8	3.80	0.2105	0.00	1076	17.93	0
9	4.20	0.1905	0.00	2149	35.81	0
10	4.60	0.1739	0.00	4332	72.19	0
11	5.00	0.1600	0.00	8798	146.64	0

Figure 47 : Calcul du facteur de sécurité de la stabilité du front